IDEI
CONTEMPORANE

CERTITUDINILE ȘI INCERTITUDINILE ȘTIINȚEI

LOUIS DE BROGLIE

EDITURA POLITICĂ

IDEI CONTEMPORANE

LOUIS DE BROGLIE
Membru al Academiei franceze,
laureat al Premiului Nobel

CERTITUDINILE ŞI INCERTITUDINILE ŞTIINŢEI

Cuvînt înainte şi control ştiinţific :
EDMOND NICOLAU

Traducere din limba franceză :
I. PECHER

1980

EDITURA POLITICĂ
BUCUREŞTI

Coperta: VALENTINA BOROȘ

LOUIS DE BROGLIE

CERTITUDES ET INCERTITUDES DE LA SCIENCE

Editions Albin Michel,
Paris, 1966

Cuvînt înainte

Contactul cu marii creatori este întotdeauna binevenit, noi, cititorii, cîștigînd prin aceasta nu numai o mare bogăție de informații, dar, ceea ce este mai prețios, pătrunzînd, astfel, în acel sanctuar intim al gîndurilor proprii unui om care și-a adus contribuția la sporirea tezaurului făurit de omenire în artă sau în știință. Și fără îndoială că Louis de Broglie este un mare creator în știință — fiind descoperitorul undelor asociate particulelor în mișcare. Dar, în același timp, el este un gînditor profund ce reflectă la problemele filozofice ale științelor, un umanist la curent cu marile probleme ale culturii, un bun cunoscător al gîndirii clasice și al artei — așa cum rezultă din studiile, cuvîntările și articolele grupate în prezentul volum. Totodată este un savant sensibil la problemele colectivității căreia îi aparține, ceea ce reiese din intervențiile sale cu privire la unele probleme fundamentale ale contemporaneității.

Desigur, el aparține galeriei marilor savanți și din acest punct de vedere ne vom strădui ca în cele ce urmează să caracterizăm cît mai succint contribuția sa majoră la istoria științei, în particular a fizicii. Vom fi însă obligați să facem unele aprecieri și asupra modului în care s-a ajuns la teoria sa, ca și asupra dezvoltărilor ulterioare ale acestei teorii. La fel după cum vom fi puși în situația de a formula puncte de vedere proprii societății noastre, modului

nostru de a judeca și a rezolva problemele, atunci cînd vom trece la analiza problemelor învățămîntului și cercetării științifice.

Louis de Broglie a intrat în istoria științei prin ideea asocierii unor unde particulelor în mișcare — idee expusă cu claritate în teza sa de doctorat (1924) și chemată să joace un rol deosebit de important în dezvoltarea mecanicii cuantice. Născut în 1892, secretar perpetuu al Academiei de Științe din Paris, pe numele său complet Louis-Victor-Pierre-Raymond de Broglie, acest savant a înaintat cu greu pe treptele ierarhiei universitare: deși laureat al Premiului Nobel pentru fizică din 1929, în 1930 nu era decît conferențiar la Sorbona.

Dar să revenim la contribuția sa fundamentală, adică la descoperirea undelor asociate particulelor în mișcare, descoperire ce stă la baza mecanicii ondulatorii, etapă esențială în dezvoltarea mecanicii cuantice actuale. La baza undelor lui de Broglie stau anumite cercetări mai vechi, întreprinse în epoca clasică a fizicii matematice, privind așa-numita ecuație a undelor, adică ecuația cu derivate parțiale care descrie inițial modul în care se propagă perturbațiile într-un mediu elastic. Ca exemple cităm ecuația coardei vibrante, care corespunde propagării vibrațiilor într-o coardă întinsă, deci unor unde unidimensionale, sau ecuația propagării sunetului în aer, unde avem unde tridimensionale. Stabilită inițial pentru mediile elastice, ea a fost extinsă ulterior la ipoteticul eter prin care se propagau vibrațiile luminoase. Marele fizician Maxwell a arătat că ecuația undelor descrie în anumite cazuri propagarea undelor electromagnetice — și aceasta independent de ipoteza eterului. În același timp, Maxwell a arătat că undele luminoase sînt unde electromagnetice. După cum se știe, această ipoteză a existenței undelor electromagnetice, deduse de Maxwell prin calcul, a fost demonstrată experimental de H. Hertz.

În zilele noastre, unii fizicieni care recunosc importanța așa-numitului grup de transformări al lui Lorentz au uneori tendința de a considera ecuația undelor ca un postulat general, într-un sens mai

general chiar decît ecuațiile lui Maxwell. Această afirmație, cuprinsă și în prefața uneia dintre lucrările de tinerețe a lui de Broglie[1]*, merită să fie explicată.*

Mult timp fizica a fost dominată de ideea forțelor care se propagă instantaneu. Astfel, pentru mecanica cerească în forma dată de Newton, interacțiunea dintre două corpuri cerești se produce printr-o forță de tipul $f = km'm''/d^2$*, unde* m' *și* m'' *sînt masele celor două corpuri,* d *este distanța dintre ele, iar* k *— o constantă universală. În acest mod de prezentare nu se spune nimic despre o eventuală propagare, variabilă în timp, a unei perturbații gravifice în jurul maselor variabile în timp. Pentru noi, care considerăm că acțiunile se pot propaga numai din aproape în aproape, acest mod newtonian de descriere a interacțiunilor gravifice nu este satisfăcător. Dar o perturbație care se propagă din aproape în aproape este, probabil, o undă. Iată de ce și de Broglie începe lucrarea amintită prin studiul ecuației undelor.*

Este însă cazul să căutăm rădăcinile istorice ale concepției lui de Broglie privind legătura dintre unde și corpusculi.

Se poate afirma că, în deducțiile sale, L. de Broglie a utilizat sistematic teoria relativității restrînse, dar, în același timp, trebuie subliniat rolul important pe care l-a jucat analogia dintre formalismul mecanicii analitice și cel al opticii, cunoașterea profundă a fizicii clasice, o mare cultură matematică și fizică. Încă din antichitate, Heron din Alexandria arătase că lumina, atunci cînd se propagă, urmează drumul cel mai scurt. Cu mult mai tîrziu, Pierre de Fermat (1601—1655) stabilise principiul care îi poartă numele, principiu conform căruia, atunci cînd se propagă chiar și într-un mediu neomogen, lumina se propagă astfel încît timpul de propagare este un extrem — de obicei un minim. În secolul următor, Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698—1759) a enunțat un principiu analog pentru meca-

---

[1] L. de Broglie, *Ondes et mouvements*, Gauthier-Villars, Paris, 1926.

nica corpului material, principiu extins de William Rowan Hamilton (1805—1865), care a arătat că întreaga mecanică clasică poate fi dedusă din principiul acțiunii minime — stabilind astfel un caz mai general decît cel studiat de Maupertuis.

Aprofundînd această analogie, de Broglie începe să compare unele procese ondulatorii cu mișcarea electronilor, publicînd, în 1923, în Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris *un prim memoriu. În anul următor își susține teza de doctorat, adîncind aceste idei. Apoi publică rezultate mai generale în reviste de specialitate*[1].

Bazîndu-se tocmai pe analogia dintre mecanică și optică, de Broglie face să corespundă unei particule o undă — așa-numita undă asociată. Dacă se notează cu v viteza particulei și cu u viteza undei asociate, atunci subzistă relația $uv = c^2$ *— unde c este viteza luminii. În concepția lui de Broglie particula este considerată ca un pachet de unde, fiecare undă avînd o viteză de fază proprie, centrul de energie al sistemului propagîndu-se cu viteza v. Ajunși în acest punct, este necesar să facem unele precizări, atît istorice, cît și de interpretare. La rîndul lor, considerentele istorice se referă, unele, la dezvoltarea fizicii înainte de L. de Broglie, altele, după apariția teoriei sale.*

Într-un studiu dedicat lui Fresnel, L. de Broglie ne face să urmărim o linie interesantă de gîndire privind teoriile luminii[2]. *Raportîndu-se la Newton, trebuie să evidențiem contribuția sa la teoria luminii, pe care o considera ca fiind formată din corpusculi ce se supun mecanicii, mai exact dinamicii punctului material. Teoria lui Newton — numită și teoria emisiei — explica anumite fenomene optice, cum ar fi reflexia și refracția, dar nu putea explica alte fenomene, descoperite chiar de Newton, și anume inelele de interferență, cum se numesc ele astăzi.*

---

[1] „Annalen der Physik", 10, 3, 22, 1925.

[2] *La Physique moderne et l'oeuvre de Fresnel*, în „Recueil d'exposés sur les ondes et corpuscules", Hermann, Paris, 1930, p. 1.

Opusă teoriei corpusculilor optici — teorie ce pare a-şi avea originea în antichitate, în teoria atomistă expusă de Lucreţiu — este teoria ondulatorie, a cărei expunere se află în tratatul lui Christian Huygens[1] *(1629—1695). La el întîlnim expusă cu claritate concepţia conform căreia lumina este analoagă unei perturbaţii ondulatorii ce se propagă pe suprafaţa unei ape liniştite. Huygens putea să interpreteze astfel atît toate fenomenele explicate prin teoria emisiei, cît şi fenomenele de interferenţă, pe care această teorie nu le putea lămuri. Aceste idei ondulatorii îşi găsesc o dezvoltare exploziva în opera lui Augustin-Jean Fresnel (1788—1827) care, recurgînd la un instrument matematic simplu, construieşte un sistem teoretic suficient pentru interpretarea tuturor rezultatelor din optica acelor timpuri. Dar este meritul altor fizicieni de a fi ridicat optica pe o treaptă nouă: ne referim, în primul rînd, la Gustav-Robert Kirchhoff (1824—1887) care, plecînd de la formalismul fizicii matematice, reuşeşte să reducă ipotezele la care ajunsese Fresnel la ecuaţia undelor scalare*[2]*. Mai mult, cu ajutorul unei teoreme clasice care îi poartă numele, demonstrase că optica geometrică — adică optica razelor luminoase — este doar un caz limită al opticii ondulatorii, caz corespunzînd frecvenţelor foarte mari, adică lungimilor de undă foarte mici.*

Succesul concepţiei ondulatorii a fost considerabil, mai ales în momentul în care ea a explicat fenomenele de difracţie şi de interferenţă. În plus, măsurarea de către Fizeau şi Foucault a vitezei luminii în diferite medii arăta că teoria emisiei e greşită, valorile determinate experimental fiind fundamental diferite de cele prezise de Newton. Astfel s-a ajuns în situaţia în care în fizică existau două concepţii diferite: pe de o parte, fizica particulelor, a corpurilor ce se supun dinamicii newtoniene; pe de altă parte, fizica ondulatorie. Dar ambele puteau fi deduse din principii variaţionale foarte asemănătoare,

---

[1] *Traité de la Lumière*, Haga, 1690; reeditare, Gauthier-Villars, Paris, 1920.

[2] Edm. Nicolau, *Cîmpuri şi unde electromagnetice*, Editura Academiei R.S.R., Bucureşti, 1972.

stabilite de Hamilton, respectiv de Fresnel. Asemănarea fundamentală dintre ele stă în faptul că ambele principii se pot formula în mod identic, cerînd ca variația unei integrale să fie nulă pentru mișcarea reală — a unei particule materiale în cazul mecanicii, a unei raze în cazul opticii. Dar există și o diferență importantă: sub semnul integralei stau mărimi diferite: în cazul mecanicii, la numărătorul integrantului figurează viteza particulei, în timp ce în cazul opticii apare tot viteza, dar la numitor. Ideea esențială a lui L. de Broglie a constat în identificarea celor două procese, postulînd că unei particule în mișcare i se asociază o undă, a cărei viteză de fază este invers proporțională cu viteza sa. În modul acesta cele două principii variaționale devin identice, deci asistăm la un proces de integrare a cărei importanță nu poate scăpa nimănui: mecanica corpului material și optica ondulatorie se integrează într-un singur edificiu.

Acest proces arată, odată în plus, lungul travaliu al spiritului uman, care în știință valorifică toate rezultatele parțiale obținute în întreaga sa istorie.

Importanța concepției lui de Broglie este considerabilă. Această teorie a apărut în contextul unor mari prefaceri ale fizicii de la începutul secolului nostru. În 1900 Max Planck (1858—1947) propusese teoria cuantică, conform căreia emisia energiei se face prin pachete, numite cuante, deci în mod discret. În 1905 Albert Einstein (1879—1955) elaborase teoria relativității restrînse. Hendrik Antoon Lorentz (1853—1928) formulase, în jurul anului 1900, teoria electronilor, bazată tocmai pe concepția unor particule avînd sarcini electrice multiple ale unei sarcini fundamentale. În 1913, Niels Bohr (1885—1962) elaborase modelul de atom ce îi poartă numele. L. de Broglie extinde conceptele sale ondulatorii la mișcarea electronilor pe orbitele atomului lui Bohr, dînd o explicație simplă unor numere cuantice (obligația ca pentru mișcarea staționară, pe o orbită dată, la efectuarea unui ciclu unda asociată să varieze ca fază cu un multiplu de 2π). Avînd

în vedere caracterul ondulatoriu al mișcării particulelor în această teorie elaborată de L. de Broglie, rezultă imediat și posibilitatea de a căuta verificarea experimentală a teoriei, prin difracția electronilor pe anumite rețele cristaline. În 1927, Davisson și Germer aduc și această dovadă experimentală.

Este un moment de cotitură în dezvoltarea fizicii teoretice și a filozofiei științei. Într-un interval scurt de timp se elaborează mecanica cuantică, în special prin lucrările lui Heisenberg, Schrödinger și Dirac. Istoricul acestei dezvoltări poate fi urmărit în lucrări speciale[1]*. Esențială este însă identificarea particulelor în mișcare, deci a substanței, cu mișcarea ondulatorie a materiei, deci cu cîmpul.*

Omul dispune astfel de un instrument teoretic cu care poate investiga microcosmosul. Iar urmările sînt dintre cele mai importante pentru practică. Ne referim la inventarea dispozitivelor electronice cu semiconductori, descoperire ce nu ar fi fost posibilă fără stăpînirea legilor care guvernează mișcarea electronilor în corpul solid, adică fără cunoașterea mecanicii cuantice.

Și fiindcă aceste descoperiri sînt legate de ceea ce se numește, cu un termen generic, „radio", trebuie să arătăm că și L. de Broglie a avut astfel de preocupări. Menționăm tratatul său clasic privind ghidurile de undă[2]*. Dar acest contact s-a menținut și mai tîrziu, L. de Broglie fiind mereu interesat de ceea ce este nou în electronică. Și în prezentul volum întîlnim articolul său privind dispozitivele electronice semiconductoare, istoria radioului etc.*

---

[1] Max von Laue, *Istoria fizicii*, Editura științifică, București, 1963; Academia de Științe a U.R.S.S., *Dezvoltarea ideilor fundamentale ale fizicii*, Editura științifică, București, 1960; P.A.M. Dirac, *Evoluția concepțiilor fizicienilor asupra tabloului naturii*, în: Materialismul dialectic și științele naturii, Editura politică, București, 1964, p. 7; W. Heisenberg, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Verlag Hirzel, Leipzig, 1930.

[2] L. de Broglie, *Problèmes de propagation guidée des ondes électromagnétiques*, Gauthier-Villars, Paris, 1941.

Legăturile sale cu problemele electromagnetismului teoretic au fost profunde. Amintim o lucrare mai puțin cunoscută, în care, plecînd de la electromagnetismul clasic, ajunge la teoria cuantică a cîmpului[1]. *Acest domeniu a cunoscut o dezvoltare continuă în ultimele decenii, astfel încît va fi necesar să ne oprim un moment asupra sa.*

Teoria cuantică a cîmpului este o teorie a substanței și a cîmpului, care a rezultat din fuziunea mecanicii cuantice cu teoria relativității restrînse, la sfîrșitul anilor '20. După o serie de fluctuații în aprecierea ei de către comunitatea oamenilor de știință, în ultimul timp este unanim acceptată și constituie principalul cadru prin care se consideră problemele fundamentale ale fizicii — aceasta ca urmare a unor răsunătoare succese. În anul 1926, Born, Heisenberg și Jordan și-au îndreptat atenția asupra cîmpului electromagnetic în spațiul vid, în absența sarcinilor și curenților. Urmează, la intervale de cîte un an, alte memorii fundamentale datorate lui Jordan și Eugene Wigner, lui Enrico Fermi, Heisenberg și Pauli. În 1934 se demonstrează că teoria cuantică a cîmpului încorporează în mod natural teoria antiparticulelor — adică a particulelor la care unele mărimi caracteristice au semn opus celor cunoscute pînă atunci. În 1936 Hideki Yukawa prezice existența unei noi particule, descoperită efectiv ulterior, în cursul unor experimente. În continuare, se emit, într-un ritm susținut, idei dintre cele mai importante pentru fizică. Ideea renormalizării a fost formulată de Weisskopf în 1936. Teoria lui Schwinger, Tomonoga, Feynman și Dyson, fără să constituie o nouă teorie fizică, fiind, de fapt, vechea teorie cuantică, este însă reformulată într-un mod ce se pretează mai bine la calcule și prevăzută cu definiții mai realiste ale mărimilor fizice[2]. *Astăzi, teoria cuantică*

---

[1] L. de Broglie, *État actuel de la théorie électromagnétique*, Congrès international d'électricité, Paris, 1932, secția 1, raport nr. 16.

[2] Steven Weinberg — laureat al Premiului Nobel, 1979 —, *Quantum field theory*, Daedalus, 106, 4, 17.

a cîmpului este încă o teorie în dezvoltare[1], *existînd eforturi de a unifica diferitele cîmpuri cunoscute, deoarece nu există încă o teorie cuantică care să cuprindă și gravitatea, de exemplu. Totuși, trebuie să menționăm că există și teoreticieni care susțin că o astfel de unificare a tuturor cîmpurilor fizice nu este posibilă, căutarea unei teorii absolut unitare fiind o himeră.*

Revenind la interesul lui L. de Broglie pentru fenomenele electromagnetice, trebuie arătat că, printre altele, el a elaborat o nouă teorie electromagnetică. Această teorie se caracterizează prin aceea că modifică ecuațiile cîmpului — așa cum au fost ele stabilite de Maxwell —, introducînd termeni suplimentari, care devin semnificativi numai în probleme ce fac să intervină distanțe foarte mari, deci în probleme de cosmologie. Această teorie a fost investigată matematic de către Gr. C. Moisil[2]. *Ulterior, Edm. Nicolau, plecînd de la aceste cercetări, a arătat care sînt modificările liniare posibile — în anumite limite date — ale ecuațiilor lui Maxwell*[3]. *L. de Broglie reia această idee și într-un studiu din prezentul volum. Pentru a-l caracteriza pe L. de Broglie, trebuie arătat că el a acordat întotdeauna o mare importanță interpretării filozofice a diferitelor teorii fizice. Dovadă stau și numeroasele sale volume în care discută astfel de teorii. Trebuie însă recunoscut că întreaga fizică modernă ridică probleme filozofice dificile, iar seria acestor dificultăți pare a fi deschisă chiar de L. de Broglie prin formularea explicită a dualității corpuscul-undă. Este greu ca, după ce am fost familiarizați cu concepția conform căreia electronul este o particulă pe care ne-o putem închipui ca pe o bilă mică — așadar precis localizată spațial —, să ad-*

---

[1] J.C. Taylor, *Gauge theories of weak interactions*, Cambridge University Press, 1976.

[2] Gr. C. Moisil, *Asupra ecuațiilor maxwelliene ale lui L. de Broglie pentru particulele de spin 1*, Studii și cercetări de fizică, I, 1, 23, 1950.

[3] Edm. Nicolau, *Propagarea undelor electromagnetice*, Editura Academiei R.P.R., București, 1960, p. 100—101.

mitem că acest electron poate fi și undă; rezultă că același electron are o mare extindere spațială, manifestîndu-se deci în anumite experimente într-un fel și în altele exact contrar. Astfel de probleme au fost și sînt amplu discutate în literatura filozofică de specialitate[1], *ca și în relațiile lui Heisenberg.*

În acest volum, Louis de Broglie, în afara unor probleme importante legate de fizica teoretică, abordează și chestiuni de istorie a tehnicii, ca și unele probleme ale societății contemporane. Ne referim la intervențiile sale privind învățămîntul, cercetarea, știința și aplicațiile ei — teme tratate în ultima parte a volumului de față.

Autorul pleacă de la constatarea că în cercetare se pornește de la o atitudine contrară celei existente în învățămînt: pe scurt, cercetarea presupune o știință mobilă, în devenire, în timp ce învățămîntul presupune o știință cristalizată, fixă. Fără îndoială, în învățămînt se predau faptele cunoscute, teoriile elaborate, în timp ce în cercetare se urmărește descoperirea necunoscutului. Dar lucrurile trebuie privite în dinamica lor: învățămîntul nu este o structură rigidă — dovadă schimbările profunde ce s-au operat în manualele de învățămînt general, în ultimii 10 ani să spunem, ca urmare a progreselor remarcabile realizate în genetică, cunoașterea cosmosului, electronică, teoria corpului solid etc. La fel, în domeniul matematicii, la același nivel al școlii generale, se predau cunoștințe de teoria mulțimilor. În liceu se predau elemente de structuri algebrice, calculul probabilităților, ecuații diferențiale. În domeniul științelor sociale întîlnim aceeași pătrundere, în școală, a unor puncte de vedere moderne. După cum nu trebuie uitat că întreaga cercetare se bazează pe formarea, în școală, a cercetătorilor.

---

[1] Mihail Florescu, *Dimensiunile cunoașterii*, Editura politică, București, 1977; Frederick Suppe (ed.), *The Structure of scientific theories*, University of Illinois Press, 1974, 682 p.; Max Jammer, *The Philosophy of quantum mechanics*, J. Wiley, New York, 1974.

Este cazul să remarcăm că și în acest domeniu la noi în țară s-a făcut un mare pas înainte prin legarea mai strînsă, în cadrul procesului de integrare, a învățămîntului cu cercetarea și producția. Tînărul care se formează în școală are posibilitatea să cunoască mai devreme ce înseamnă cercetarea, își poate forma deprinderi și în acest domeniu, înțelegînd — și aceasta ni se pare esențial — dialectica modului în care se trece, în permanență, de la cunoscut la necunoscut. Iar, prin verificarea în practică a cunoștințelor dobîndite, la verificarea temeiniciei lor. După cum se arată în „Programul-directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnic în perioada 1981—1990 și direcțiile principale pînă în anul 2000", adoptat la cel de-al XII-lea Congres al P.C.R., „este necesar să se acționeze cu fermitate pentru orientarea permanentă a activității de cercetare spre cerințele concrete ale dezvoltării industriei, agriculturii, construcțiilor, transporturilor, celorlalte ramuri ale economiei naționale și vieții sociale, legarea tot mai strînsă a științei de producția de bunuri materiale și spirituale. Rolul activ al științei în acest domeniu trebuie să se manifeste atît prin participarea nemijlocită a cercetătorilor la îndeplinirea sarcinilor de plan ce revin unităților de producție în fiecare perioadă, cît și prin elaborarea de noi soluții tehnologice pentru dezvoltarea în perspectivă a diferitelor sectoare ale vieții economico-sociale"[1].

Considerăm justă necesitatea semnalată de autor a reformării învățămîntului spre a face loc noilor cuceriri ale științei, ca și a „umanizării" științei prin introducerea unor elemente de istorie a științei. Credem că prin integrarea învățămîntului, așa cum se procedează la noi, se creează o bază pentru asigu-

---

[1] Programul-directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și de introducere a progresului tehnic în perioada 1981—1990 și direcțiile principale pînă în anul 2000, Editura politică, București, 1979, p. 39.

rarea unei bune metode de transmitere a ştiinţei, ca şi pentru legarea ei de viaţă.

Astăzi, cînd utilajul ştiinţific a devenit atît de costisitor, cînd sumele absorbite de cercetări cresc vertiginos, dezideratul propus de autor de a i se lăsa cercetătorului libertate absolută în investigaţiile sale este contrazis de experienţa socială în întreaga lume. Evident, în cercetarea teoretică fundamentală, fiecare autor are o libertate deplină. Dar chiar şi în unele cercetări, să spunem de genetică, unde din eprubetă pot ieşi viruşi extrem de periculoşi, are oare cercetătorul libertatea de a crea orice? Evident nu! Dealtminteri chiar autorul, în studiul următor privind viitorul ştiinţei, se arată conştient de pericolul nuclear — deci implicit de necesitatea îngrădirii obligatorii a libertăţii de a face orice în numele libertăţii de cercetare ştiinţifică. Louis de Broglie se vădeşte optimist în faţa viitorului, fără a specifica ce anume, ce factor raţional ne dă încredere în progresul ştiinţei.

Dar, ceea ce este poate mai important, volumul se termină cu o idee deosebit de frumoasă: chiar dacă ştiinţa devine din ce în ce mai mult o unealtă minunată, în acelaşi timp ea rămîne un mare ornament al spiritului.

Societatea noastră se bazează pe ştiinţă şi fără nici o îndoială că societatea viitorului se va baza tot mai mult pe ştiinţă. Iar în dezvoltarea ştiinţei contemporane, Louis de Broglie a adus o contribuţie majoră, dualitatea corpuscul-undă fiind şi o ilustrare a modului în care dialectica se impune gîndirii umane.

EDMOND NICOLAU

Prefață

În lucrarea de față sînt reunite articole sau discursuri pe care am avut ocazia să le scriu sau să le țin în ultimii ani. Cele cu care se deschide volumul se referă toate, mai mult sau mai puțin direct, la cercetările pe care le-am efectuat în cursul acestei perioade, și anume la acelea care tind să reformeze interpretarea actualmente admisă a mecanicii ondulatorii și a fizicii cuantice despre care am vorbit deja în cartea mea apărută în aceeași colecție, „Perspective noi în microfizică". Am împărțit aceste expuneri în două serii. Prima serie cuprinde articole cu caracter general, destul de ușoare ca lectură, în care ideile care mă călăuzesc actualmente sînt prezentate mai întîi sub o formă personală, apoi într-o manieră mai obiectivă. Seria a doua grupează, pe lîngă cîteva puneri la punct ale unor probleme particulare, expunerea în două articole, urmate, fiecare, de reproducerea unei note apărute în dările de seamă ale Academiei de Științe, mai întîi a modului meu actual de a concepe coexistența undelor și corpusculilor în structura luminii și a altor radiații electromagnetice, apoi a unei ramuri cu totul noi a termodinamicii pe care o elaborez de cinci ani și pe care o putem numi „Termodinamica ascunsă a particulelor".

Ceea ce caracterizează eseurile de care am vorbit este faptul că se inspiră direct din profundele ob-

servații ale lui Albert Einstein, făcute mai ales la începutul carierei sale, asupra coexistenței undelor și particulelor, coexistență pe care a descoperit-o în 1905 în cazul luminii și pe care eu am generalizat-o, cu aproape douăzeci de ani mai tîrziu, la toate particulele, în lucrările mele de bază asupra mecanicii ondulatorii.

În 1905, la vîrsta de 26 de ani, Einstein, într-un foc de artificii intelectual fără îndoială unic în istoria științelor, a pus bazele, aproape simultan, ale celebrei teorii a relativității, ale concepției dualiste a luminii precum și ale formelor noi ale termodinamicii statistice, care i-au permis să dezvolte frumoasele interpretări date de el fenomenelor de fluctuație și mișcării browniene. Dacă teoria relativității sub forma ei restrînsă și sub forma ei generalizată a fost, pe drept, obiectul a numeroase lucrări, memoriile atît de importante pe care, în decurs de peste douăzeci de ani, Einstein le-a consacrat cuantelor de lumină („fotonii" noștri de azi) și fluctuațiilor termodinamice sînt în mare parte cam prea mult date uitării astăzi. În ceea ce privește observațiile, din păcate de natură exclusiv critică, făcute de Einstein în cursul ultimilor treizeci de ani ai vieții sale asupra interpretării fizicii cuantice, marea lor importanță a fost, cred, în genere subestimată, dar eu n-am încetat în ultimii cincisprezece ani să meditez asupra lor.

Dealtfel, este curios de observat că încercarea mea de a elabora o termodinamică ascunsă a particulelor, care are drept cel mai frapant rezultat readucerea principiului minimei acțiuni la principiul al doilea al termodinamicii, se sprijină pe trei baze esențiale. Mai întîi, firește, e coexistența undelor și particulelor în ce privește lumina și materia interpretată pe baza vechilor mele idei asupra „teoriei dublei soluții"; apoi sînt principiile generale ale teoriei relativității și anume faimosul principiu al inerției energiei și forma relativistă a termodinamicii; în sfîrșit, intervenția metodelor introduse recent de Einstein în termodinamica

statistică și previziunea fenomenelor de fluctuație ce decurg de aici. Astfel în acest eseu intervin concomitent cele trei idei fundamentale generate aproape simultan de creierul puternic al celui mai mare fizician-teoretician al secolului nostru. Și este, desigur, regretabil că Einstein nu mai e printre noi pentru a aprecia această sinteză destul de surprinzătoare a celor trei ramuri noi ale teoriei fizicii pe care el le-a introdus exact acum șaizeci de ani.

În sfîrșit, în partea a treia a lucrării de față se vor găsi reunite cîteva discursuri sau note compuse la diverse ocazii și avînd adesea caracterul unei biografii. Cum majoritatea acestor texte sînt mai ușor de citit decît cele precedente, ele au fost plasate la finele volumului pentru a nu impune cititorului un efort prea prelungit.

LOUIS DE BROGLIE

2 decembrie 1965

Articole cu caracter general

ANXIETATEA MEA ÎN FAȚA PROBLEMEI CUANTELOR[1]

Aveam 19 ani cînd am simțit în mine o vocație pentru fizica teoretică. După ce am trecut prima parte a bacalaureatului în latină-științe, apoi partea a doua în matematici și filozofie, atras de studiul istoriei, de care nu am încetat niciodată să mă interesez, am pregătit și am obținut la 18 ani licența în istorie la Sorbona. Am început apoi să studiez dreptul, dar tocmai atunci lectura diferitelor lucrări, și anume cele ale lui Henri Poincaré, m-a readus spre știință.

M-am apucat așadar să mă pregătesc pentru licența în științe care se obținea atunci după trecerea unei serii de examene succesive, dar orientarea mea s-a precizat chiar din acea epocă. Fratele meu Maurice, încă tînăr om de știință, a fost însărcinat să redacteze procesele-verbale ale primului Consiliu Solvay, care s-a ținut la Bruxelles în octombrie 1911. Acest consiliu era consacrat studiului teoriei cuantelor și la el au luat parte cei mai mari savanți ai epocii din domeniul fizicii matematice, ca Max Planck, Einstein, Henri Poincaré, Lorentz și alții. Curînd după aceasta, fratele meu îmi comunică ciornele proceselor-verbale pe care le redactează. Citesc cu entuziasm aceste texte dificile, descopăr în ele importanța acestei noi teo-

[1] Text scris în vara anului 1961.

rii a cuantelor pe care Planck, într-o străfulgerare de geniu, o introdusese în 1900 și pe care Einstein o extinsese sub o formă nouă în teoria sa despre cuantele de lumină. Sensul adînc al acestei mari revoluții a fizicii teoretice îmi apare clar: ea înseamnă că imaginile de unde și de corpusculi, folosite pînă atunci de teoreticienii fizicii în diferite domenii, undele pentru reprezentarea luminii și radiațiilor, corpusculii pentru cea a materiei și structurii sale, trebuie să intervină în realitate *amîndouă* în toate domeniile. Dar cum se poate realiza o astfel de sinteză în care trebuie să intervină fără nici o îndoială această misterioasă „constantă a lui Planck" care astăzi, după o jumătate de secol, nu și-a dezvăluit încă secretul? Or, deja unele observații îmi rețin atenția: încă de pe la mijlocul secolului al XIX-lea Hamilton, apoi Jacobi au observat o anumită analogie între legile mecanicii care guvernează mișcarea corpusculilor și legile teoriei undelor care determină propagarea radiațiilor. Se admitea, în general, că această analogie era pur formală, dar tînăra mea imaginație a intrat în acțiune și am început să mă întreb dacă această analogie nu are un sens fizic profund, dacă ea nu este susceptibilă să ne conducă spre acea sinteză a imaginilor de undă și de corpuscul, a cărei necesitate mi se pare a o arăta apariția în fizică a misterioaselor cuante. Și astfel, odată licența în științe obținută, mă hotărăsc să mă consacru studiului acestei probleme.

Dar în acea vreme, în 1913, nu eram decît un adolescent plăpînd al cărui viitor se afla încă în mîinile zeilor. În octombrie plec să-mi fac serviciul militar în compania de radiotelegrafiști a regimentului 8 geniu. Apoi izbucnește războiul din 1914 și astfel, timp de șase ani, părăsind aproape complet proiectele mele de studii privind cuantele, undele și corpusculii, sînt obligat să mă consacru tehnicii radiotelegrafiei. Or, această tehnică trecea atunci printr-o evoluție rapidă și hotărîtoare; încă embrionară în 1914, ea se transformă radical în cîțiva ani prin introducerea lămpilor triode care

vor permite în curînd realizarea radiotelefoniei și apoi a radiodifuziunii, așa cum o cunoaștem astăzi. Asistînd astfel la nașterea acestor forme noi de telecomunicații, eu nu am încetat, de atunci, să mă interesez de dezvoltarea lor, și anume de douăzeci de ani, de progresul tehnicilor noi ale radarului, hiperfrecvențelor și tranzistorilor.

După terminarea războiului din 1914 am revenit să lucrez în laboratorul fratelui meu, pe atunci orientat în principal spre studiul razelor X și al efectului fotoelectric și, întorcîndu-mă astfel la preocupările mele din prima tinerețe, m-am regăsit în fața acelei probleme a undelor și corpusculilor pe care o întîlnim la fiecare pas în chestiunile privind radiațiile de foarte înaltă frecvență. Am reflectat îndelung asupra acestei probleme și, după diverse studii preliminare, am ajuns în cîteva note din toamna anului 1923, apoi, mai detaliat, în teza mea de doctorat, susținută în noiembrie 1924, la stabilirea unei corelații precise între mișcarea unui corpuscul și propagarea unei unde în care intervine constanta lui Planck și am reușit să demonstrez că această corelație permite să se înțeleagă multe lucruri rămase pînă atunci foarte misterioase, de exemplu existența stărilor staționare în atomi. Ideile pe care le-am emis atunci au avut foarte rapid un succes la care nu îndrăzneam să mă aștept. Dezvoltate matematic de Schrödinger în 1926, confirmate experimental de descoperirea fenomenului remarcabil al difracției electronilor în 1927, ele stau la baza a ceea ce se numește astăzi mecanica ondulatorie și la originea a nenumărate alte dezvoltări diverse.

Dar, în timp ce toată această mișcare de idei începea să se desfășoare cu o viteză rapid accelerată, personal rămîneam oarecum perplex. Cînd ideile de bază ale mecanicii ondulatorii mi-au apărut în minte, nu m-am îndoit nici o clipă că ele trebuiau să conducă, în cele din urmă, la o imagine clară și sintetică a asocierii undelor și corpusculilor, respectînd ceea ce era esențial în noțiunile clasice despre aceste entități. Iar în timp ce în

străinătate savanți eminenți ca Bohr, Born și Heisenberg se angajau pe o cu totul altă cale, care îi ducea la o interpretare cu totul diferită a dualității undelor și corpusculilor decît aceea pe care o căutam, eu ajunsesem la o concepție care mi-a fost inspirată, mai mult sau mai puțin conștient, de profundele observații făcute de Einstein asupra acestei chestiuni. În 1926—1927 am dezvoltat această interpretare a mecanicii ondulatorii sub denumirea de „teoria dublei soluții". Fără a intra în amănunte prea complicate, voi spune doar că ea consta în a admite că orice corpuscul, element al materiei sau foton de lumină, constituie un fel de singularitate în sînul unei unde extinse în care e încorporat și care ghidează mișcarea sa fiindcă el este solidar cu această undă. Imaginea astfel obținută mi se părea satisfăcătoare, deoarece ea reprezenta în mod clar și precis asocierea undelor și a corpusculilor în fizica la scară atomică. Rămînea însă de interpretat rolul undei considerate în mod obișnuit în mecanica ondulatorie, undă care e omogenă și nu conține nici o singularitate care să permită localizarea în ea a unui corpuscul. Credeam că voi realiza aceasta demonstrînd că unda continuă a mecanicii ondulatorii este o undă fictivă, care reprezintă statistic diversele posibilități de localizare a corpusculului: credeam că această reprezentare era exactă, dar că, așa cum sînt toate reprezentările statistice, era incompletă, deoarece lăsa să-i scape individul pentru a nu descrie decît situația medie. Astfel, în concepția mea, oricărei rezolvări uzuale a ecuațiilor de unde ale mecanicii ondulatorii care oferă doar o descriere statistică trebuia să-i corespundă o altă soluție, comportînd o singularitate și reprezentînd adevărata asociere a undei și a corpusculului în realitatea fizică profundă. De aici și denumirea de teorie a dublei soluții pe care am dat-o încercării mele.

Concepției pe care o susțineam îi lipsea însă o justificare matematică completă: îi lipseau, de asemenea, am recunoscut-o în ultimii ani, anu-

mite elemente esențiale fără de care ea nu putea fi cîtuși de puțin viabilă. În fața dificultăților întîlnite pentru a da ideilor mele o formă într-adevăr satisfăcătoare și în urma întrunirii la Bruxelles, în octombrie 1927, a celui de-al V-lea Consiliu de fizică Solvay, la care interpretarea pur probabilistă a mecanicii ondulatorii susținută de Bohr, Born și Heisenberg a biruit, în ciuda obiecțiilor lui Einstein și Schrödinger, am fost determinat să-mi întrerup eforturile pentru a găsi o altă formă. De ce am fost oare atunci așa de descurajat și am încetat să-mi urmăresc scopul la care țineam atîta, acela de a obține o imagine precisă a universului microfizic realizînd o veritabilă sinteză care să permită o înțelegere clară a coexistenței undelor și corpusculilor? Un prim motiv a fost, evident, că încercarea pe care o întreprinsesem cerea, eram conștient de acest lucru, rezolvarea unor probleme extrem de grele în fața cărora mă simțeam dezarmat, în timp ce teoria adversă se prezenta ca un edificiu matematic deja foarte elegant și foarte riguros, așezat pe baze relativ simple și care permitea, așa cum o demonstra în fiecare zi tot mai mult experiența, prevederea sau explicarea unor fenomene importante. Un alt motiv al renunțării mele, mai curios poate din punct de vedere psihologic, a fost următorul: chiar în momentul cînd îmi dădeam seama, în 1928, de dificultatea de a continua efortul meu de interpretare, intrasem în învățămîntul superior, ca profesor însărcinat cu predarea teoriilor fizicii la facultatea de științe din Paris și mă aflam astfel în fața unei sarcini cu totul noi pentru mine, sarcină pe care o îndeplinesc de treizeci și trei de ani și pe care, ajuns la vîrsta pensionării, o voi părăsi fără îndoială anul viitor. Or, învățămîntul obligă ca lucrurile pe care le expunem să fie prezentate într-o formă coerentă, iar cînd e vorba de fizica teoretică, să fie matematic corectă; el mai cere, la nivelul facultăților, ca elevii să fie ținuți la curent cu cele mai recente progrese și cu rezultatele cele mai instructive. Nu ne putem deci mulțumi cu intuiții care nu au căpă-

tat o formă definitivă sau cu teorii de abia schițate. Acestea sînt motivele pentru care, cel puțin într-o anumită măsură, se poate spune că învățămîntul se abate uneori de la cercetare.

Iată-mă așadar, la 36 de ani, profesor care ține cursuri și începe să formeze elevi. Am început această carieră sub cele mai strălucite auspicii, deoarece abia împlinisem un an vechime în noua mea profesie cînd Academia de Științe din Suedia mi-a decernat Premiul Nobel pentru fizică. Această înaltă distincție arăta valoarea ce era acordată în cercurile științifice ideilor pe care le introdusesem cu privire la asocierea undelor și corpusculilor, atît de strălucit confirmate de importantele succese ale mecanicii ondulatorii și de recenta descoperire fundamentală a fenomenului difracției electronilor de către cristale.

Nu este locul să redau aici pe scurt activitatea mea în învățămîntul superior în decurs de peste 30 de ani, cursurile pe care le-am ținut pentru a expune principiile, dezvoltările și aplicațiile mecanicii ondulatorii, lucrările personale efectuate pentru a ameliora unele din aceste teorii sau a introduce în ele cîteva idei noi, expunerile sau conferințele pe care le-am consacrat difuzării unor aspecte noi ale fizicii cuantice. Singurul lucru pe care aș vrea să-l menționez aici este că, pînă în 1950, nu am revenit la încercările de interpretare pe care le întreprinsesem odinioară, apoi le abandonasem, și că m-am ținut de interpretarea pur probabilistă a lui Bohr, Born și Heisenberg, adoptată de majoritatea fizicienilor. În 1950 însă, aș spune aproape spre propria-mi uimire, am ajuns să mă întreb dacă această interpretare a mecanicii ondulatorii și a fizicii cuantice era realmente satisfăcătoare și dacă, pentru a găsi o adevărată explicație a asocierii undelor și corpusculilor, nu ar trebui să revin într-un fel la concepțiile mele din tinerețe. Aș vrea acum să spun cîteva cuvinte despre acest nou reviriment al gîndirii mele.

Pentru a-i face înțeleasă originea, ar trebui mai întîi explicat ce înseamnă exact această interpretare

pur probabilistă a fizicii cuantice adoptată de majoritatea fizicienilor. E însă un lucru greu de făcut, deoarece această interpretare a fost prezentată destul de diferit de către diverși autori și deoarece, prin însăși natura sa, ea este destul de vagă și destul de surprinzătoare pentru spiritele neavertizate. Nu pot deci să dau aici despre ea decît o idee foarte sumară. Această interpretare se bazează pe cîteva idei noi, care par importante și exacte. Astfel, de exemplu, pare cert că orice experiență de măsurare avînd ca obiect să ne dea o informație asupra universului microfizic modifică, în general, într-un mod deloc neglijabil, starea de lucruri existentă anterior și, corelativ, poate apărea ca imposibil să măsurăm simultan cu precizie anumite mărimi ce caracterizează corpusculii, cum sînt poziția lor și starea lor de mișcare. Această imposibilitate este exprimată prin faimoasele „relații de incertitudine" ale lui Heisenberg, a căror exactitate este neîndoielnică. Pornind însă de la aceste observații exacte, teoriile astăzi admise, care se sprijină, adeseori fără discuție critică, pe un anumit număr de postulate, poate contestabile și care capătă progresiv forme din ce în ce mai abstracte, au izbutit în mod destul de paradoxal să suprime orice realitate fizică, atît a undelor cît și a corpusculilor. Unda nu mai e decît o formă matematică servind la evaluarea probabilităților, pe cînd corpusculul, răspîndit în general „în stare potențială" într-o regiune întinsă a spațiului, pare să nu mai existe decît atunci cînd se manifestă prin fugitive localizări observabile. Pentru a caracteriza această concepție greu de precizat, Bohr a găsit odată un cuvînt care s-a impus: el a spus că unda și corpusculul sînt aspecte „complementare" ale realității, cu alte cuvinte că ele sînt imagini incompatibile, dar a căror intervenție succesivă este necesară pentru a reprezenta ansamblul fenomenelor observate. Dacă folosirea cuvîntului „complementaritate" servește numai pentru a traduce apariția succesivă de aparențe corpusculare

și ondulatorii în fenomene incontestabile, această folosire este cu totul legitimă, în schimb ea nu constituie nicidecum o explicație reală a dualității undelor și corpusculilor. Complementaritatea poate fi comparată cu „virtutea dormitivă“ a opiului de care și-a bătut joc Molière: este perfect legitim să tra lucem proprietățile soporifice ale opiului atribuind acestei substanțe o „virtute dormitivă“, dar trebuie să ne ferim a vedea în aceste cuvinte o explicație a acestor proprietăţi. Pe complementaritatea lui Bohr și pe extensiunile riscate ale relațiilor de incertitudine s-a căutat fundarea a tot felul de considerațiuni filozofice despre care ceea ce se poate spune în cel mai bun caz e că sînt periculoase. Unii sînt adesea prea tentați să construiască teorii filozofice generale pe datele, întotdeauna susceptibile de a fi revizuite, ale cunoașterii științifice.

Deci, de aproape zece ani, mă tot întreb dacă interpretarea actualmente admisă a mecanicii ondulatorii este într-adevăr definitivă și dacă, dincolo de succesele sale certe și de rigoarea sa aparentă, ea nu ne ascunde adevărata natură profundă a coexistenței undelor și corpusculilor. Nu e vorba, bineînțeles, de a contesta valoarea statistică a formalismelor elegante și precise cu care jonglează teoreticienii fizicii cuantice contemporane, ci de a ne întreba dacă aceste formalisme ating într-adevăr fondul lucrurilor și dacă interpretarea propusă de ei are un caracter definitiv. Fiind nevoit să urmăresc îndeaproape formularea ipotezelor care servesc ca baze pentru interpretările actuale, am putut să le supun unei critici serioase: am putut astfel să găsesc, în toată această construcție, unele puncte slabe, unele consecințe paradoxale și să notez cîteva postulate care, deși au fost firesc sugerate de formalismul matematic, nu corespund poate realității fizice. Așa că am fost determinat să reiau concepțiile pe care le dezvoltasem cu treizeci de ani în urmă: dealtfel am fost nevoit să le aduc un anumit număr de modificări și unele adăugiri care mi se par acum indispensa-

bile. În ultimii zece ani s-au realizat progrese în această reinterpretare a mecanicii ondulatorii, orizonturi noi de un foarte mare interes s-au deschis în faţa ochilor mei. Am fost serios ajutat în această muncă de cîţiva cercetători tineri care au avut îndrăzneala de a se lansa pe această cale: spun îndrăzneală, deoarece trebuie curaj pentru a înfrunta un curent de idei predominant şi a te pune astfel în opoziţie cu maeştri eminenţi sau influenţi. Personal nu am consacrat decît eforturi destul de limitate acestei sarcini anevoioase. La vîrsta mea, şi în situaţia mea, eşti copleşit de diverse obligaţii şi devine aproape imposibil să-ţi păstrezi timpul şi forţele necesare pentru a urmări cu continuitate lucrări personale grele.

Mă găsesc deci astăzi într-o poziţie destul de curioasă. Am fost, acum aproape 40 de ani, unul dintre iniţiatorii mecanici ondulatorii şi ai fizicii cuantice contemporane. Am fost martor, nu fără oarecare surpriză, al succesului extrem de rapid al concepţiilor mele, al strălucitei lor verificări experimentale şi al prodigioaselor dezvoltări pe care le-au avut în cele mai diverse domenii. Şi totuşi, nu sînt mulţumit. În primăvara vieţii mele am fost obsedat de problema cuantelor şi a coexistenţei undelor şi corpusculilor în universul microfizic: am făcut eforturi decisive, dar totuşi incomplete, pentru a-i găsi soluţia. Astăzi, în toamna existenţei mele, aceeaşi problemă continuă să mă preocupe, deoarece, în ciuda atîtor succese obţinute şi a drumului parcurs, nu cred că enigma a fost într-adevăr rezolvată. Viitorul, un viitor pe care fără îndoială nu-l voi vedea, va tranşa poate chestiunea: el va spune dacă punctul meu de vedere actual este eroarea unui om ajuns la o vîrstă destul de înaintată care rămîne legat de ideile sale din tinereţe sau dacă, dimpotrivă, el exprimă clarviziunea unui cercetător care a reflectat în decursul întregii sale vieţi asupra problemei celei mai fundamentale a fizicii contemporane.

REPREZENTĂRILE CONCRETE ÎN MICROFIZICĂ

Imaginile teoretice ale fizicii clasice

Teoriile fizicii clasice s-au dezvoltat admițînd realitatea universului fizic și căutînd să obțină despre el reprezentări concrete. Bineînțeles, ele nu pierdeau din vedere faptul că omul de știință, observînd universul fizic și măsurînd mărimile a căror cunoaștere este necesară pentru precizarea imaginii pe care el și-o face despre acesta, poate foarte bine să perturbe starea de lucruri existentă înaintea observațiilor sau măsurătorilor sale, dar ele nu conțineau nimic care să pară a prejudicia ideea că în fiecare clipă există o realitate fizică bine determinată, exterioară oamenilor care o observă. Reprezentările teoretice obținute se exprimau, de la începuturile științei moderne, în limbajul precis al matematicilor: evident, acest limbaj are, prin însăși natura sa, ceva abstract și formal, dar majoritatea fizicienilor nu puneau la îndoială caracterul concret al universului fizic ale cărui formule matematice nu aveau ca scop decît să dea o descriere mai mult sau mai puțin exactă.

Un alt caracter al teoriilor fizicii clasice era că ele căutau să dea o descriere a realității fizice și să urmărească evoluția ei servindu-se întotdeauna de cadrul spațiului și al timpului, datul prim al vieții noastre cotidiene, și stabilind o legătură cauzală între fenomenele succesive. Pentru a ilustra aceasta prin două exemple care vor juca un mare

rol în cele ce urmează vom aminti că fizica clasică își reprezintă întotdeauna un corpuscul ca un mic obiect localizat în spațiul care descrie o traiectorie în cursul timpului cu o viteză bine definită în fiecare clipă și că această traiectorie reprezintă o undă cu ajutorul unui „cîmp" de mărimi, de valori bine definite în fiecare punct și în fiecare moment, care se propagă în spațiu în cursul timpului conform unor legi matematic precise. În fine, ansamblul evoluției universului fizic era descris cu ajutorul unor ecuații diferențiale și cu derivate parțiale care stabileau o legătură cauzală între stările succesive ale universului fizic fiindcă ele determinau starea existentă într-un anumit moment în funcție de starea care exista în starea imediat anterioară.

Aceste metode tradiționale ale fizicii clasice repurtaseră mereu mari succese și lor li se datorează toate progresele fizicii moderne începînd din secolul al XVI-lea pînă la începutul secolului al XX-lea. Apariția concepțiilor teoriei relativității, din 1905, cu toate că această teorie a dus la stabilirea între spațiu și timp a unei legături pînă atunci nebănuite și a adus multe schimbări ale punctelor de vedere, nu a modificat nimic esențial în spiritul metodelor folosite pînă atunci de fizica teoretică. Pentru fiecare observator galileian care folosește spațiul și timpul său propriu, descrierea fenomenelor rămîne conformă tipului clasic. În spațiul-timp, existența întreagă a unui corpuscul va fi reprezentată printr-un tub de univers infinit de fin care exprimă totodată caracterul foarte localizat al corpusculului pentru fiecare observator și deplasarea sa în decursul timpului de-a lungul unei traiectorii pe care el are, în fiece moment, o viteză bine determinată. Tot astfel o undă va fi reprezentată în spațiul-timp printr-un cîmp de mărimi bine definite în fiecare punct care, pentru fiecare observator, va apărea ca un fenomen ondulatoriu ce se propagă în spațiu în cursul timpului conform unei legi determinate. Și astfel teoria relativității regăsește, pentru a reprezenta evoluția universului fizic, un formalism matematic care se

bazează în esență pe ecuații diferențiale sau cu derivate parțiale analoage acelora pe care le folosea fizica anterioară.

Se știe că, la sfîrșitul secolului al XIX-lea, fizica clasică, obligată să țină cont de structura atomică a materiei, a trebuit să construiască teorii statistice care recurgeau la intervenția calculului probabilităților. Cum a putut ea să o facă păstrînd caracterul cauzal al înlănțuirii fenomenelor și ideea că mărimile fizice au întotdeauna o valoare bine determinată? Aceasta e o întrebare foarte importantă pentru cele ce urmează și asupra căreia, din acest motiv, trebuie să ne oprim cîteva clipe.

Apariția probabilităților în fizica teoretică era considerată, foarte firesc, ca rezultînd dintr-o ignorare parțială a stării, presupusă totdeauna bine determinată, a universului fizic. Spun „ignorare parțială", deoarece, dacă ignoranța noastră ar fi totală, nu am putea introduce nici o lege utilizabilă de probabilitate, iar dacă ignoranța noastră ar fi nulă, am avea certitudine și nu probabilitate. Introducerea unei legi de probabilitate atrage după sine incertitudini și aceste incertitudini sînt cu atît mai mari cu cît ignoranța noastră este mai mare. Dar aceste incertitudini, și aceasta caracterizează în esență punctul de vedere clasic, nu corespund deloc unei nedeterminări veritabile a stării universului fizic, stare presupusă a exista și a fi bine definită chiar atunci cînd ignorăm parțial detaliile ei. Ca exemplu simplu, putem considera teoria cinetică a gazelor sub forma ei clasică. Ea admite că fiecare moleculă a unui gaz posedă în fiecare moment o poziție și o viteză bine determinate, dar mereu variabile într-o manieră extrem de complicată din cauza ciocnirilor particulelor între ele și de pereții recipientului care conține gazul. Ca urmare, noi ignorăm în fiecare moment poziția și starea de mișcare a moleculelor: totuși ignoranța noastră asupra stării gazului nu este completă, fiindcă știm că o moleculă oarecare a gazului este neapărat prezentă în vasul ce conține acest gaz și că, spre exemplu, acest vas este menținut, prin contact termic cu un

termostat, la o temperatură determinată. Vedem, într-adevăr, că probabilitățile se introduc aici ca urmare a ignoranței noastre asupra stării exacte a gazului care este parțial necunoscută.

Considerarea cîtorva mărimi care au valori aleatorii conduce la o schemă statistică foarte cunoscută. În această schemă se introduce, pentru fiecare mărime aleatorie, o repartiție de probabilități valabile atunci cînd nu se știe nimic despre valoarea celorlalte mărimi aleatorii: se introduc, de asemenea, pentru fiecare mărime probabilități „legate", exprimînd probabilitatea unei valori a mărimii, atunci cînd valorile celorlalte mărimi aleatorii sînt cunoscute. Această schemă clasică și formulele care o exprimă se deduc cu ușurință din următoarea ipoteză care, în cadrul ideilor clasice, apare ca foarte naturală: statistica se referă la o mulțime de indivizi, iar pentru fiecare dintre aceștia valorile mărimilor aleatorii sînt bine determinate. Să ilustrăm aceasta printr-un exemplu foarte simplu. Într-un contingent de tineri recruți fiecare recrut are o talie și o circumferință a pieptului ce pot fi măsurate: pentru ansamblul contingentului se poate stabili o schemă statistică privind taliile și circumferințele pieptului cu repartiția de probabilități și repartiția probabilităților legate pentru aceste două mărimi. Imposibilitatea de a întocmi o astfel de schemă statistică ar fi foarte greu de interpretat, deoarece ea ar fi în opoziție cu caracterul concret al realității fizice.

Să insistăm asupra unui alt punct foarte important. Concepția clasică a probabilității conduce la distingerea foarte clară a „probabilităților actuale" de „probabilitățile prevăzute". Probabilitățile actuale se referă la o situație pe care o ignorăm parțial, dar care este actualmente realizată. Probabilitățile prevăzute se referă la o situație ce *ar putea* fi realizată după o anumită modificare a situației actuale. Un exemplu va preciza aceasta. Un om are în față o ruletă (în sensul de ruletă de joc) care comportă un număr egal de pătrățele roșii și pătrățele negre și care se învîrtește.

Ştim că acest om are o bilă într-una din mîinile sale, dar nu ştim în care din ele. Această necunoaştere introduce pentru poziţia bilei o probabilitate care, în situaţia actuală, are următoarele valori.

$$(A)\begin{cases} \text{mîna dreaptă a omului } \frac{1}{2}\text{; pătrăţelul roşu al ruletei } 0 \\ \text{„ stîngă „ } \frac{1}{2}\text{; „ negru „ } 0 \end{cases}$$

Dacă omul ar lansa bila pe ruletă şi bila s-ar opri în cele din urmă pe un pătrăţel a cărui culoare nu am remarcat-o încă, probabilitatea pentru poziţia bilei ar căpăta următoarele valori:

$$(B)\begin{cases} \text{mîna dreaptă a omului } 0\text{; pătrăţelul roşu al ruletei } \frac{1}{2} \\ \text{„ stîngă „ } 0\text{; „ negru „ } \frac{1}{2} \end{cases}$$

Dar, atîta timp cît omul păstrează bila în mîna sa, repartiţia (A) a probabilităţilor este „actuală", pe cînd a doua (B) nu e decît „prevăzută" şi poate să nu devină niciodată actuală.

Acestea sînt observaţii foarte simple, dar utilitatea lor va apărea atunci cînd vom analiza principiile microfizicii cuantice.

Ne vom opri aici cu această analiză foarte sumară a metodelor şi a modurilor de reprezentări ale fizicii clasice. Chiar cei care astăzi consideră că aceste reprezentări sînt în întregime perimate trebuie să recunoască că ele erau foarte clare şi posedau un grad înalt de raţionalitate.

Răsturnarea determinată de progresele microfizicii în reprezentările fizicii teoretice

Nu e locul să expunem aici originile microfizicii. Vom reaminti numai că ea a avut ca punct de plecare descoperirea structurii discontinue a ma-

teriei, adică a existenței moleculelor, atomilor, electronilor etc. O remarcă importantă ce trebuie făcută în această privință este că particulele materiei nu sînt niciodată observabile direct: noi nu putem dovedi existența lor decît observînd un fenomen macroscopic (cum sînt: înnegrirea locală a unei plăci fotografice, formarea unei picături lichide într-o cameră Wilson etc.) *declanșat* prin acțiunea particulei.

La începutul dezvoltării microfizicii, această știință nouă și-a construit primele reprezentări teoretice cu ajutorul concepțiilor fizicii clasice, și în special cea de corpuscul bine localizat care descrie o traiectorie bine definită. Destul de curînd însă, ea s-a izbit pe acest drum de foarte mari greutăți. Descoperirea rolului esențial pe care îl joacă constanta lui Planck în constituirea sistemelor la scară atomică și în schimburile de energie între materie și radiație a arătat existența la scări foarte mici a unor procese în aparență complet discontinui, de un tip cu totul străin concepțiilor clasice. În afară de aceasta, descoperirea ulterioară a asocierii permanente a corpusculilor și undelor, realizată mai întîi în cazul luminii de către Einstein (teoria fotonilor), apoi generalizată, după vreo 20 de ani, de mecanica ondulatorie pentru toți corpusculii materiali, a pus, în condiții foarte grele, o problemă de o însemnătate fundamentală. Dornic să păstreze, în liniile lor mari, concepțiile clasice din cauza clarității și raționalității lor, autorul articolului de față a încercat, între anii 1924 și 1927, o interpretare a mecanicii ondulatorii în care corpusculul era conceput ca un fel de singularitate încorporată unei unde a cărei mișcare ar fi legată de propagarea undei printr-o relație în care intervine constanta lui Planck. Din nefericire, această încercare, extrem de atrăgătoare prin imaginea precisă a dualismului undă-corpuscul pe care o dădea, s-a izbit de la început de greutăți ce păreau de netrecut. Majoritatea fizicienilor teoreticieni au preferat să se orienteze într-o direcție cu totul diferită și să adopte concepții care, renun-

ţînd la orice reprezentare concretă a realităţii microfizice, se abat considerabil de la acelea ale fizicii clasice.

Nu putem expune aici în amănunt această interpretare actualmente „ortodoxă“ a microfizicii cuantice: nu putem expune decît cîteva aspecte ale ei. Una din consecinţele cele mai importante ale ei este abandonarea, pentru reprezentarea fenomenelor microfizice, a imaginilor precise şi concrete în cadrul spaţiului şi timpului (şi a spaţiului-timp relativist): de aici rezultă dispariţia oricărei legături cauzale stricte între evenimentele succesive, deoarece existenţa unei astfel de legături cauzale implică o conexiune strînsă a celor ce se petrec în diversele puncte ale spaţiului în cursul timpului.

Abandonarea unei reprezentări concrete a realităţii microfizice în cadrul spaţiului şi timpului a dus la o serie de consecinţe pe care fizicienii de acum o jumătate de secol le-ar fi găsit destul de paradoxale. Astfel corpusculii, a căror imagine sîntem obligaţi să o păstrăm din cauza caracterului foarte localizat al manifestărilor lor, nu mai sînt concepuţi ca nişte obiecte mici localizate în spaţiu: ei sînt, ni se spune, răspîndiţi în general „în stare potenţială“ în regiunea întinsă a spaţiului pe care o ocupă unda mecanicii ondulatorii. Dar această undă însăşi nu mai este considerată ca o realitate fizică ce corespunde repartiţiei continue a unui „cîmp“ care se propagă în spaţiu în decursul timpului: ea nu ar mai fi decît o reprezentare abstractă şi subiectivă a probabilităţilor manifestărilor corpusculului. Şi totuşi, această undă, într-un fel pur formală, ar fi susceptibilă să provoace apariţia unor fenomene de interferenţă şi de difracţie (care se obţin astăzi tot atît de bine cu electronii ca şi cu lumina) şi să determine, prin stările lor staţionare, în condiţii cu limite date, energiile stărilor cuantificate ale sistemelor atomice. De aici rezultă pentru unda mecanicii ondulatorii un caracter hibrid şi puţin comprehensibil, semi-subiectiv şi semi-obiectiv. Cei care predau mecanica ondula-

torie sînt obligați să oscileze permanent între o reprezentare concretă și o concepție abstractă a undei, ceea ce este puțin satisfăcător. În vechea mea încercare de interpretare am căutat să evit această circumstanță paradoxală deosebind două unde, două soluții ale ecuației de unde, una care să fie o reprezentare concretă și obiectivă a undei ce transportă un corpuscul care îi este încorporat, cealaltă care să aibă un caracter subiectiv și care ar fi o reprezentare construită de cel ce o folosește după informațiile pe care le posedă sub forma undei obiective: astfel s-ar risipi misterul care înconjură și astăzi natura veritabilă a undei mecanicii ondulatorii și atunci se vede de ce am dat încercării mele de interpretare denumirea de „teorie a dublei soluții".

Aspectul oarecum fantomatic luat de undă și de corpuscul în microfizica „ortodoxă" l-a condus odinioară pe Bohr să introducă noțiunea de „complementaritate". Această noțiune foarte evazivă cu greu poate fi bine definită. Se spune adesea că aspectul granular și aspectul ondulatoriu al corpusculilor sînt aspecte complementare ale realității ce nu se manifestă niciodată simultan în experiență. Cu această ultimă precizare, formula mi se pare inexactă. Într-adevăr, să considerăm o fotografie de franje de interferențe obținută cu fotoni sau cu electroni. Aspectul granular este prezent pe placa fotografică, fiindcă se știe că imprimarea fotografică este produsă de incidența succesivă a corpusculilor ale căror impacte pot fi descoperite în stratul sensibil al plăcii; dar aspectul ondulatoriu este și el prezent pe placă, fiindcă pe ea se conturează franjele. În timp ce impactele cu caracter granular sînt fenomene de incidențe individuale de proiectile, franjele de interferențe rezultă dintr-o repartiție statistică a acestor impacte pe placa fotografică. Aspectul corpuscular și cel ondulatoriu al fotonului sau al electronului sînt deci observabile simultan pe placă, dar au semnificații cu totul diferite. Definiția complementarității amintită mai sus nu este deci acceptabilă și, după

părerea mea, trebuie să ne mulţumim să definim complementaritatea în felul următor: „Aspectul granular și aspectul ondulatoriu al corpusculilor sînt complementare în sensul că este necesar să facem ca aceste două aspecte să intervină pentru interpretarea ansamblului proprietăților observabile ale corpusculilor". Definită în acest fel prudent, complementaritatea nu e mai mult decît constatarea unui fapt: ea nu constituie deloc o explicație și extrapolările care s-au făcut din această noțiune în afara domeniului microfizicii par extrem de periculoase.

Formalismul de obicei admis în mecanica ondulatorie conduce în mod firesc la relațiile de incertitudine ale lui Heisenberg. Dacă x și p_x sînt una din coordonatele unui corpuscul și componenta corespunzătoare a cantității sale de mișcare, repartițiile de probabilitate admise pentru x și p_x conduc la definirea pentru valorile acestor două mărimi a incertitudinilor Δx și Δp_x și se demonstrează că se obține în ordinea de mărime inegalitatea:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geqslant h$$

în care h este constanta lui Planck. De aici se trage concluzia că cele două incertitudini nu pot fi nule în același timp și că, dacă una ar fi nulă, cealaltă ar fi infinită. Ce înseamnă însă exact în inegalitatea precedentă simbolurile Δx și Δp_x? Și aici se pare că teoreticienii oscilează între două interpretări posibile. O primă interpretare este că Δx este incertitudinea asupra coordonatei x a viitoarei localizări observabile a corpusculului, pe cînd Δp_x este incertitudinea asupra rezultatului unei măsurări a lui p_x. O altă interpretare este că Δx și Δp_x sînt incertitudini existente privind x și p_x în starea considerată. Există o mare diferenţă între aceste două interpretări: a doua admite, într-adevăr, că, în starea considerată, incertitudinile Δx și Δp_x corespund unor probabilităţi actuale, pe cînd prima admite că cel puţin una din incertitudini, Δp_x, corespunde unei probabilităţi prevăzute care nu va deveni actuală decît după acțiunea dispozitivului

de măsurare a lui p_x. Se pare că majoritatea autorilor admit a doua interpretare și consideră Δx și Δp_x ca veritabile „nedeterminări" ale valorilor mărimilor x și p_x: corpusculul ar fi prezent potențial în întregul interval Δx, iar valorile lui p_x ar ocupa potențial întregul interval Δp_x. Prima interpretare pare însă mult mai justificată, mai ales într-o teorie în care se admite, pe drept, că orice experiență de măsurare modifică în întregime situația inițială, deoarece în acest caz cum putem admite că cele două incertitudini ar putea corespunde aceleiași situații?

Maniera uzuală de a interpreta relațiile lui Heisenberg, care mi se pare inexactă, l-a condus pe von Neumann să afirme, printr-un raționament celebru, că este imposibil de a restabili o reprezentare concretă a realității microfizice prin introducerea unor „variabile ascunse". Esențialul raționamentului lui von Neumann poate fi rezumat astfel: dacă ar fi posibil să restabilim o reprezentare concretă a realității microfizice, ar trebui să se poată defini stări în care toate incertitudinile ar fi nule; or, aceasta este imposibil fiindcă incertitudini ca Δx și Δp_x nu pot fi simultan nule. Această concluzie nu este însă exactă decît dacă incertitudinile Δx și Δp_x ce figurează în inegalitățile lui Heisenberg sînt considerate ca raportîndu-se la aceeași situație. Dacă se admite, iar noi am văzut că aceasta pare mult mai justificat, că Δx și Δp_x se raportează în mod necesar la situații diferite, atunci concluzia lui von Neumann nu se mai impune deloc.

Dacă examinăm cu atenție cum intervin probabilitățile în interpretarea „ortodoxă" a mecanicii ondulatorii, observăm că noțiunea de probabilitate nu mai are aici deloc același sens ca în teoriile fizicii clasice. Introducerea probabilităților nu ar rezulta din faptul că nu cunoaștem o situație care ar exista și ar fi integral definită, dar ale cărei

detalii le-am ignora parțial. Ea ar rezulta dintr-o veritabilă nedeterminare a anumitor mărimi. Din acest punct de vedere nou ar decurge că schema statistică clasică, despre care am vorbit mai înainte, nu ar mai fi valabilă. Dealtfel, nu s-ar mai putea stabili deosebirea, pe care am precizat-o mai înainte, între probabilitățile actuale și probabilitățile prevăzute (și aceasta deși teoria ortodoxă insistă în mod special asupra perturbării pe care orice operație de măsurare o introduce în mod inevitabil). Toate modificările pe care sîntem astfel obligați să le introducem în ce privește probabilitatea, ni se par destul de obscure și, în ansamblu, puțin satisfăcătoare.

Nu putem decît să semnalăm în treacăt cîteva alte caracteristici singulare ale teoriei microfizice actuale. Pentru a prevedea statistic evoluția unui sistem de corpusculi în interacțiune, ea examinează propagarea unei unde în spațiul configurațiilor, acest spațiu fiind constituit prin definiție de ansamblul coordonatelor corpusculilor sistemului. În ciuda succesului incontestabil al acestei metode de calcul, ea rămîne în mod curios paradoxală, deoarece e destul de greu de înțeles ce pot fi coordonatele unor corpusculi care nu sînt permanent localizați în spațiul fizic tridimensional; în afară de aceasta, propagarea unei unde în spațiul configurațiilor are un caracter atît de evident fictiv, încît este greu de crezut că ea poate realmente să guverneze fenomene fizice.

O altă caracteristică singulară a concepțiilor actuale este că ele se refuză oricărei descrieri a tranzițiilor cuantice al căror tip este tranziția bruscă între stări staționare în atomul lui Bohr. Dacă fizica clasică ar fi trebuit să examineze această problemă, ea ar fi considerat, desigur, tranzițiile cuantice ca stări tranzitorii de extrem de scurtă durată și, din această cauză, fără îndoială neobservabile, dar care totuși ar fi trebuit, în principiu, să poată fi descrise printr-o imagine concretă în

spaţiu şi timp. Or, Bohr a declarat cîndva că aceste tranziţii cuantice „transcendeau“ orice descriere în termeni de spaţiu şi de timp, şi acest refuz de explicaţie, atît de contrar tendinţelor tradiţionale ale ştiinţei, părea, în mod greşit desigur, să se impună cu necesitate.

Datorită lui Dirac, ecuaţiile de unde ale electronului au luat o formă relativistă care conţine „spinul“ acestui corpuscul. Apoi s-a putut generaliza forma ecuaţiilor, astfel încît ele să se poată aplica unor particule cu spin mai mare decît acel al electronului. Toate aceste ecuaţii au fost interpretate într-un mod destul de abstract în cadrul formalismului uzual acceptat. Deşi spinul, de cînd a fost introdus în fizică de Uhlenbeck şi Goudsmit, a fost interpretat ca traducînd un fel de rotaţie internă a particulei, respingerea de către teoria actuală a oricărei imagini concrete în cadrul spaţiului şi timpului nu a permis precizarea acestei reprezentări a spinului. Este totuşi greu de a scăpa de impresia că existenţa spinului ne dezvăluie analogia dintre particulele elementare ale microfizicii şi micile turbioane.

Am rezumat unele aspecte ale microfizicii teoretice actuale. Cu toate criticile ce pot fi aduse unora din aceste concepţii, este incontestabil că ea a înregistrat mari succese. Ea s-a extins de cîţiva ani prin dezvoltări teoretice noi, cunoscute sub denumirea de „teoria cuantică a cîmpurilor“. Din cauza caracterului lor dificil, nu voi întreprinde nimic pentru a le rezuma. Voi spune numai că au accentuat şi mai mult caracterul foarte formal şi abstract al edificiului teoretic actual şi că au introdus alte noţiuni noi al căror sens exact e destul de greu sesizabil, cum e aceea de „particulă virtuală“. Teoria cuantică a cîmpurilor a cunoscut succese la începuturile sale, dar s-a lovit de mari greutăţi, şi la ora actuală se poate avea impresia că fecunditatea ei s-a epuizat fiindcă s-a angajat prea mult în formalisme artificiale.

Rezumatul criticilor ce pot fi adresate concepţiilor actuale ale microfizicii

Dorim acum să rezumăm succint dificultăţile ridicate de forma actualmente ortodoxă a teoriilor microfizicii.

Mai întîi ele implică abandonarea completă a reprezentărilor concrete ale realităţii fizice la scară foarte mică. Ele tind astfel să abandoneze noţiunea de obiectivitate însăşi. „Atomul nu mai e decît un sistem de ecuaţii", a spus odată un teoretician calificat. Acesta e un punct de vedere care, împins la extrem, se va întîlni cu „idealismul" sau pozitivismul unor filozofi sub formele lor cele mai accentuate şi este destul de analog cu cel al „energetiştilor" care, la începutul secolului nostru, respingeau încă, contrar oricărei evidenţe, existenţa structurii atomice a materiei. Cred că pentru un fizician va fi întotdeauna foarte greu să admită că nu există o realitate fizică independentă de oamenii care o observă.

În concepţiile actuale se pot releva uşor multe contradicţii. Se resping imaginile concrete şi se folosesc mereu concepţiile deduse din aceste imagini, ca, de pildă: poziţia unui corpuscul, cantitatea de mişcare etc., concepţii de care spiritul nostru nu se poate lipsi. Ne folosim de spaţiul configuraţiilor, a cărui definiţie însăşi introduce coordonatele corpusculilor, refuzînd totodată să admitem că corpusculii au în mod constant o localizare în spaţiu etc.

În teoria actuală poate fi relevată de asemenea folosirea constantă a explicaţiilor pur verbale care sînt echivalente cu refuzul explicaţiilor. Acesta e cazul, precum am văzut, pentru noţiunile de complementaritate, de prezenţa potenţială a unui corpuscul într-o regiune întinsă a spaţiului, de caracterul „transcendent" al tranziţiilor lui Bohr, de intervenţia în interacţiunile de particule „virtuale" etc.

Am insistat deja asupra caracterului hibrid atribuit undei considerate pe rînd, într-un mod

destul de inexplicabil, ca o realitate obiectivă susceptibilă să producă anumite fenomene observabile sau ca o simplă reprezentare subiectivă de probabilități. Am insistat de asemenea asupra caracterului bizar al schemei statistice la care se ajunge și care se abate complet de la schema tradițională. Sîntem determinați astfel, aproape fără a ne da seama, să examinăm simultan situații diferite și să confundăm probabilitățile actuale și probabilitățile prevăzute. De aici rezultă o interpretare contestabilă a relațiilor de incertitudine, care conduce la teorema lui von Neumann, a cărei demonstrație este fără îndoială iluzorie.

La criticile precedente mai trebuie adăugată o remarcă foarte importantă. Teoria microfizică uzuală, adeseori denumită mecanică cuantică, se bazează în întregime, cu excepția cîtorva încercări foarte recente, pe ecuații liniare care permit, atunci cînd s-au găsit mai multe soluții, să se obțină, adunîndu-le, o soluție nouă (principiul de superpoziție): aceasta înseamnă că soluțiile ecuațiilor pot să se adauge fără să reacționeze în vreun fel una asupra alteia. Întrucît analiza ecuațiilor liniare a putut fi efectuată într-un mod foarte aprofundat de către matematicieni, mecanica cuantică s-a putut constitui într-un corp de doctrină care este din punct de vedere formal foarte riguros și foarte elegant. Pentru o teorie fizică însă nu e suficient ca ea să fie matematic riguroasă și elegantă: mai trebuie ca ea să traducă exact realitatea fizică. Or, argumentele dezvoltate mai de mult de către Einstein conduc la ideea că legătura dintre corpusculi și cîmpurile care îi înconjură (unda mecanicii ondulatorii, de exemplu) nu poate fi exprimată decît cu ajutorul ecuațiilor neliniare. Dealtfel, liniaritatea este întotdeauna în natură o primă aproximare: ea nu este aproximativ realizată decît pentru fenomene slabe, de mică amplitudine. Or, existența corpusculilor, fapt demonstrat experimental, nu poate fi reprezentată în mod concret decît printr-o mare concentrare locală de energie corespunzînd unui fenomen foarte intens de mare

amplitudine: este deci posibil ca, prin însăşi natura sa, ea să se sustragă oricărei reprezentări liniare. Se ajunge astfel la următoarea concluzie foarte importantă: „Dacă interpretarea actuală a mecanicii ondulatorii s-a dovedit incapabilă să reprezinte într-un mod clar şi concret dualitatea undelor şi corpusculilor, aceasta se explică poate prin faptul că ea s-a închis de bună voie a priori în cadrul prea îngust al liniarităţii".

Încheind acest paragraf, trebuie să semnalăm că diverşi oameni de ştiinţă, printre care spirite atît de eminente ca Einstein şi Schrödinger, au ridicat grave obiecţii împotriva interpretării actuale a microfizicii cuantice şi au arătat că această interpretare duce în unele cazuri la rezultate paradoxale şi foarte puţin acceptabile. Deşi argumentele lor au fost contestate, personal credem, după ce am reflectat îndelung asupra acestei chestiuni, că aceste argumente au o mare valoare şi aruncă un dubiu serios asupra ansamblului ideilor actualmente admise.

Posibilitatea unei întoarceri la reprezentările concrete în microfizică

Am văzut că legile de probabilitate enunţate de teoria actuală dau previziuni statistice bune. Se poate presupune însă că ele nu ating fondul lucrurilor şi că ar fi cazul să se „sape", dacă se poate spune aşa, dedesubtul teoriei actuale pentru a regăsi o imagine concretă a realităţii fizice la scară foarte mică, care să fie compatibilă cu rezultatele statistice bine stabilite. E ceea ce a exprimat Einstein cînd a spus că teoriile actuale ale microfizicii sînt statistic exacte, dar că nu dau o reprezentare *completă* a realităţii fizice.

Teoria dublei soluţii pe care am schiţat-o în 1926—1927 era tocmai o încercare de a ajunge la o descriere mai completă de acest gen. Nu pot expune aici în amănunt această concepţie destul

de subtilă la care am revenit de vreo 10 ani în urma unei lucrări a lui Bohm și a colaborării mele cu Jean-Pierre Vigier și alți cîțiva tineri cercetători. Nu pot decît să trimit la expunerile succesive pe care le-am făcut asupra ei în cursul ultimilor ani pe măsură ce ea se preciza.

Voi reaminti numai că ea consideră unda reală a mecanicii ondulatorii ca pe o undă obiectivă, care ar comporta o foarte mică regiune de valori foarte ridicate ale amplitudinii: acest accident foarte localizat ar fi corpusculul în sensul uzual al cuvîntului. Corpusculul ar fi astfel încorporat undei și mișcarea sa ar fi determinată de propagarea undei după o lege pe care am denumit-o „formula ghidării". Ghidarea ar fi realizată prin acțiuni neliniare care se exercită în foarte mica regiune unde își are sediul corpusculul. În afara acestei mici regiuni, unda s-ar supune ecuațiilor liniare admise în mod curent, iar unda de obicei luată în considerare în mecanica ondulatorie ar coincide, pînă la un factor constant, cu această undă exterioară. Această undă luată în considerare în mod obișnuit, unda Ψ, fiind astfel lipsită de accidentul localizat care transportă unda obiectivă, ar deveni o undă fictivă, cu caracter subiectiv, care ar mai permite previziuni statistice exacte, dar nu ar mai putea furniza o imagine concretă a corpusculului. Reîntîlnim astfel ideile pe care le-am expus mai înainte, în paragraful al doilea, asupra deosebirii introduse de teoria dublei soluții între unda obiectivă avînd caracter concret și unda subiectivă, simplă reprezentare de probabilitate.

Analize aprofundate, efectuate pe baza ideilor schițate mai sus, par într-adevăr să demonstreze că întreaga interpretare actuală a mecanicii ondulatorii se bazează pe anumite confuzii: confuzia între unda obiectivă și unda subiectivă, confuzia între probabilități actuale și probabilități prevăzute etc. Așa cum am arătat detaliat în alte expuneri, interpretarea mecanicii ondulatorii prin teoria dublei soluții permite evitarea acestor confuzii. Putem astfel restabili o imagine concretă

a undei și a corpusculului și regăsim schema statistică clasică referitoare la indivizi cu proprietăți bine determinate. Probabilitatea redevine în acest caz rezultatul necunoașterii parțiale a unei situații care există și care e bine definită și putem din nou să distingem după maniera clasică probabilitățile actuale și probabilitățile prevăzute. De aici rezultă o modificare a semnificației atribuite în genere relațiilor de incertitudine, care devin de tipul:

incertitudine actuală asupra lui $x \cdot$ incertitudine prevăzută asupra lui $p_x \geqslant h$.

Δx și Δp_x nu mai pot fi considerate ca nedeterminări veritabile ale poziției și ale cantității de mișcare, ci numai ca incertitudini datorate unei necunoașteri parțiale a situației existente realmente. Aceste incertitudini corespund unor situații diferite, una anterioară oricărei măsurări, alta — posterioară măsurării lui p_x, și această împrejurare infirmă demonstrația teoremei lui von Neumann. Întoarcerea la aceste reprezentări concrete în cadrul spațiului și timpului dă impresia agreabilă că reîncepem să înțelegem.

În cadrul acestor concepții noi trebuie, firește, să căutăm a interpreta succesul metodei care reprezintă proprietățile unui sistem de corpusculi în interacțiune prin propagarea unei unde pur fictive în spațiul configurațiilor sistemului. Teoria dublei soluții trebuie să-și reprezinte propagarea în spațiu în cursul timpului a atîtor unde concrete cîți corpusculi sînt în sistem, fiecare corpuscul constituind un accident foarte localizat al undei sale individuale. Această reprezentare are avantajul imediat de a reda un sens precis coordonatelor corpusculilor și, ca urmare, folosirii spațiului de configurare. Mai trebuie însă explicat cum pot mișcările corpusculilor, definite prin formula ghidării, pornind de la undele lor individuale, să se preteze la o reprezentare statistică exactă prin propagarea unei unde fictive în spațiul configurațiilor. Problema este dificilă și nu voi da despre ea aici o idee completă; cred însă că au fost realizate progrese importante

pentru a o rezolva datorită lucrărilor efectuate de mine în cursul ultimilor ani împreună cu Andrade e Silva.

Am văzut că, pentru a interpreta ghidarea mișcării corpusculului prin propagarea undei, teoria dublei soluții a fost nevoită să admită că ecuațiile de propagare a undei, deși pot fi considerate cel mai adesea, în afara accidentului care constituie corpusculul, ca aproximativ liniare, trebuie să fie totuși neliniare. Această împrejurare ar putea avea consecințe extrem de interesante. Ea ar putea permite, într-adevăr, să se prevadă „stări tranzitorii" cu proprietăți neprevăzute și, în special, să se dea o descriere, în cadrul spațiului și al timpului, a tranzițiilor cuantice între stări staționare. Aceste tranziții nu ar transcende deloc cadrul spațiului și al timpului: ele ar fi pur și simplu procese foarte rapide de readaptare la o nouă stare stabilă. Astfel de procese sînt frecvent întîlnite în teoriile neliniare ale fizicii clasice și, dacă mecanica cuantică este obligată să atribuie tranzițiilor cuantice un caracter transcendent, e poate pentru că ea se închide pur și simplu în cadrul prea îngust al liniarității. Aceasta nu e totuși decît o sugestie, dar s-ar putea ca ea să deschidă în viitor teoriei microfizice cîmpuri neexplorate.

Să spunem cîteva cuvinte despre problema, atît de importantă la ora actuală, a particulelor fundamentale. Un timp îndelungat fizicienii nu au cunoscut decît trei particule pe care le puteau califica drept fundamentale: electronul, protonul și fotonul de lumină. Dar, începînd din 1930, această frumoasă simplitate s-a spulberat, deoarece s-au descoperit succesiv neutronul, electronul pozitiv „antiparticulă" a electronului, mezonul μ, apoi mezonul π, fără a mai vorbi de neutrin, a cărui existență a rămas multă vreme destul de ipotetică. De vreo zece ani această „faună" microfizică s-a extins considerabil. Cunoaștem acum un mare număr de particule și antiparticule care se

împart în particule ușoare sau „leptoni", în particule de masă medie sau „mezoni" și în particule grele sau „barioni", la care se adaugă fotonul de lumină. Fiecare din aceste particule este caracterizată prin masa, sarcina electrică și spinul ei, dar astăzi știm că, pentru a defini complet o particulă, trebuie să adăugăm la aceste trei mărimi cunoscute de mai înainte alte trei mărimi identificate mai recent: isospinul, numărul barionic și numărul de stranietate. Teoria microfizică se află deci în fața obligației de a căuta să interpreteze ansamblul acestor fapte foarte complexe. Or, ea este foarte stingherită s-o facă fiindcă actualmente se refuză localizarea particulelor în spațiu și deci nu li se poate atribui o structură, deoarece o structură este în mod necesar definită de localizările relative ale părților unui întreg. În special, teoria actuală nu poate defini clar „raza" unei particule, cum definea Lorentz la timpul său raza electronului, și acest lucru se află la originea unora dintre cele mai importante dificultăți pe care le întîmpină. Or, în cursul ultimilor ani, Vigier și colaboratorii săi, conduși de ideea de a reveni la reprezentări concrete în microfizică, au reușit să dezvolte o teorie a particulelor care le reprezintă în cadrul spațiul-timp ca pe obiecte întinse avînd o structură internă bine definită. Ei au arătat că această imagine, dacă e aprofundată, conține mai multe elemente decît s-ar fi putut crede la prima vedere și permite definirea ansamblului mărimilor a căror introducere s-a vădit necesară pentru a caracteriza diversele feluri de particule. Ei au putut să regăsească astfel formula, astăzi celebră, a lui Gell-Mann care permite să se exprime sarcina electrică în funcție de isospin, de numărul barionic și de numărul de stranietate. Această încercare pare extrem de interesantă și succesul ei, dacă se confirmă, ar aduce un argument hotărîtor în favoarea ideii că o întoarcere la reprezentările concrete în microfizică ar putea fi foarte fructuoasă.

Concluzie

Reprezentarea concretă a realității fizice în cadrul spațiului și al timpului cu conexiune cauzală a fost la originea tuturor progreselor științei moderne: ea este conformă tendințelor profunde ale spiritului nostru, și dacă ne abatem de la ea încetăm să o înțelegem.

De 35 de ani microfizica s-a lovit de mari dificultăți, care au putut părea chiar de neînvins, pentru a menține acest gen de imagini și, neizbutind să parvină la aceasta, a renunțat. Chestiunea este de a ști dacă această renunțare foarte gravă este, într-adevăr, necesară și dacă nu s-ar putea, cu ajutorul unor concepții noi și al unor analize mai aprofundate, să se revină la o reprezentare concretă a realităților microfizice care se apropie de acelea de tip clasic. Personal cred astăzi că acest lucru e realizabil și că trebuie făcute eforturi mari pentru a ajunge la el. Într-adevăr, ar putea fi periculos pentru viitorul fizicii ca ea să se mulțumească prea ușor cu formalisme pure, cu imagini vagi și cu explicații pur verbale ce se exprimă prin cuvinte cu semnificație imprecisă.

IDEILE CARE MĂ CĂLĂUZESC ÎN CERCETĂRILE MELE*

Considerații generale

În cercetările mele nu vreau să mă supun unui sistem filozofic preconceput, spre exemplu să admit a priori că determinismul este universal, deoarece nu mă simt calificat pentru a emite o opinie atît de absolută. Dealtfel, cred că influența anumitor sisteme filozofice, cum sînt pozitivismul sau idealismul, a fost destul de nefastă în dezvoltarea contemporană a fizicii cuantice. Totodată, sînt profund convins că există o realitate fizică exterioară nouă, care e independentă de gîndirea noastră și de mijloacele noastre imperfecte de a o cunoaște, fără de care unitatea cunoștințelor umane, acordul tuturor oamenilor asupra constatării faptelor ar fi de neînțeles. Cred, de asemenea, în necesitatea de a ne întemeia teoriile privind fenomenele fizice pe concepții clare și pe imagini precise asupra evoluției lor în spațiu și în timp (sau, mai exact, în spațiul-timp einsteinian, întrucît exactitatea concepțiilor relativiste nu mi se pare că trebuie pusă la îndoială).

Cu toate acestea, căutarea cauzalității care leagă fenomenele succesive a fost întotdeauna și rămîne încă ghidul cel mai sigur al cercetării științifice. Uimitoarele progrese contemporane ale biologiei, de exemplu, se bazează în esență pe o mai bună cunoaștere a fenomenelor chimice, electrice

* Expunere (inedită) scrisă în decembrie 1965.

sau mecanice care influențează desfășurarea proceselor biologice, pe cînd încercările făcute de unii autori, ca Jordan, pentru a introduce un nedeterminism cuantic în explicarea fenomenelor vieții, au rămas pînă acum fără nici o eficacitate.

Este esențial să remarcăm că, dacă formalismele matematice sînt singurele care ne permit, în științele unde pot fi introduse, să dăm ideilor noastre o mare precizie, ele prezintă totuși unele pericole deoarece, lăsîndu-ne seduși de claritatea și automatismul lor, putem să uităm cu ușurință că ele nu furnizează niciodată altceva decît consecințele ipotezelor ce au fost puse la baza lor. Intuiția și imaginația sînt singurele care permit spargerea cercului în care se închide în mod firesc orice gîndire ce vrea să fie pur deductivă. Un exemplu al acestui fapt, deosebit de important pentru noi, este folosirea aproape exclusivă a analizei liniare de către teoriile cuantice actuale. Se știe că o teorie fizică este liniară atunci cînd, după ce s-au găsit mai multe soluții ale ecuațiilor pe care ea se bazează, se poate admite că suma acestor soluții este de asemenea o soluție, dar aceasta e a priori o împrejurare cu totul specială, a cărei realizare strictă trebuie să fie o excepție. Caracterul liniar ce se atribuie în general ecuațiilor fizicii cuantice actuale conduce la importanța acordată de ea spațiului funcțional denumit „spațiul Hilbert", spațiu abstract care nu are, evident, nici un caracter fizic. În multe ramuri ale fizicii, numeroase fenomene pot fi considerate ca fiind guvernate de ecuații liniare sau cel puțin foarte aproximativ liniare, a căror manipulare este relativ ușoară. Ni se pare însă prea puțin probabil ca natura veritabilă a universului microfizic și, în special, structura unităților (fotoni sau particule materiale) care îl compun să poată fi reprezentate prin ecuații liniare sau chiar prin ecuații foarte slab neliniare. Dezvoltarea încă destul de embrionară a analizei neliniare nu ne permite deloc să sperăm realizarea unor progrese rapide în acest domeniu, dar aceasta nu e un motiv să admitem ca ipoteză de bază caracterul liniar

sau evasiliniar al proceselor microfizice. Dimpotrivă, putem să credem că problemele puse de fizica cuantică și coexistența undelor și corpusculilor nu-și vor găsi adevărata lor interpretare decît în cadrul unor teorii cu caracter neliniar.

Nu trebuie, dealtfel, să ne lăsăm înșelați de reprezentările matematice. Dacă concepte abstracte cum este cel al spațiului lui Hilbert în fizica cuantică, al spațiului configurațiilor în mecanica clasică și în mecanica ondulatorie, al extensiunii de fază în termodinamica statistică constituie auxiliari foarte clari și foarte utili pentru expunerea teoriilor, ar fi o gravă eroare să li se atribuie o realitate fizică pe care nu o pot avea și să fie considerate drept cadrul veritabil al desfășurării fenomenelor, desfășurare care are loc totdeauna, credem noi, în cadrul spațiului fizic și al timpului.

Un alt pericol care amenință neîncetat dezvoltarea fizicii teoretice și arată necesitatea de a preciza în acest domeniu sensul termenilor folosiți este utilizarea unor cuvinte a căror semnificație poate fi interpretată în moduri diferite. Aș cita ca exemplu cuvîntul „incertitudine", atît de folosit în fizica cuantică din ziua cînd Heisenberg a enunțat faimoasele sale „relații de incertitudine". Ce înseamnă exact afirmația că poziția unei particule într-o undă care umple o regiune întinsă a spațiului este incertă? Înseamnă oare aceasta că particula are în fiecare moment o poziție în această regiune a spațiului, dar că noi nu cunoaștem această poziție sau poate chiar că ne este imposibil să o determinăm? Sau aceasta înseamnă că poziția particulei în întreaga întindere a acestei regiuni este realmente nedeterminată, că ea este, într-un fel, „omniprezentă" în ea? Toate reflecțiile mele din ultimii ani pe această temă m-au dus la convingerea că prima interpretare este foarte clară și firească, pe cînd celei de-a doua este foarte greu să i se atribuie o semnificație cu adevărat satisfăcătoare. În ceea ce mă privește, cred că o mărime fizică are în realitate totdeauna o valoare bine determinată. Faptul că valoarea unei mărimi

este *necunoscută* (sau chiar că noi am fi în imposibilitate practică de a o cunoaște) nu înseamnă deloc că această valoare este *nedeterminată*. Astfel, faptul că poziția sau cantitatea de mișcare a unui corpuscul în unda sa nu ne este cunoscută sau scapă măsurătorilor noastre nu înseamnă deloc că această mărime nu are în orice moment o valoare determinată. Voi reveni dealtfel mai departe asupra acestui punct.

Se mai întîmplă uneori ca în expunerea dezvoltărilor teoretice să se oscileze între două interpretări contradictorii ale aceluiași cuvînt, trecîndu-se pe furiș și aproape inconștient de la una la cealaltă. Astfel mulți autori (și, fără îndoială, în unele din lucrările sale, chiar autorul acestui studiu) consideră pe rînd unda Ψ, folosită de obicei în mecanica ondulatorie, fie ca o undă reală, proces fizic capabil să determine fenomene fizice observabile cum sînt interferențele, difracția, stările staționare ale atomilor etc., fie ca o simplă reprezentare de probabilități care nu are mai multă „forță de constrîngere" asupra fenomenelor fizice decît un tabel de mortalitate asupra decesului indivizilor. Se poate spune că din acest punct de vedere predarea obișnuită a mecanicii ondulatorii se bazează pe un perpetuu echivoc.

Vom termina aceste considerații generale afirmînd că progresele științei, considerate independent de aplicațiile lor, au rezultat întotdeauna din eforturi de „a înțelege mai bine". Dorința de a înțelege a fost la originea tuturor reușitelor sale. În plus, sînt înclinat astăzi să cred că e mai bine să fim foarte rezervați față de afirmația, atît de des repetată de 40 de ani încoace de numeroși fizicieni, potrivit căreia fenomenele de tranziție cuantică ar transcende, pentru a folosi un cuvînt al lui Niels Bohr, orice descriere în termeni de spațiu și de timp și, prin urmare, ar fi definitiv incomprehensibile. Mi se pare mai firesc și mai conform ideilor care au orientat întotdeauna în chip fericit cercetarea științifică să presupunem că tranzițiile cuantice vor putea fi interpretate într-o bună zi poate cu

ajutorul unor mijloace analitice de care nu dispunem încă, ca procese foarte rapide, dar în principiu descriptibile în termeni de spațiu și de timp, analoge acelor treceri bruște de la un ciclu limită la altul pe care le întîlnim foarte des în studiul fenomenelor mecanice și electromagnetice neliniare. Lucrările efectuate în ultimii ani de către unii dintre colaboratorii mei (Francis Fer, Joâo Luis Andrade e Silva și Georges Lochak) îmi dau multe speranțe în această privință.

La modul mai general aș spune că, atunci cînd un proces fizic ni se pare imposibil de înțeles și de reprezentat, trebuie să ne gîndim întotdeauna că noi și viguroase eforturi intelectuale ne vor permite într-o bună zi să-l înțelegem și să-l reprezentăm.

Pe de altă parte, istoria științelor ne învață că gîndirea savanților, ca și aceea a celorlalți oameni, nu e lipsită de o anumită inerție. Cînd o teorie, adică un anumit mod de a considera și a prevedea o clasă de fenomene, a înregistrat un succes, există tendința de a se opri la ea și, prinvind-o ca definitivă, de a nu se face efortul de a mai examina și altele. Astfel, se întîmplă adeseori că inovatorii, vreau să spun toți cei care propun idei noi, se lovesc de rezistențe puternice și aceasta chiar atunci cînd există bune motive de a atribui o mare pondere opiniilor lor. Pentru a ne limita la domeniul fizicii și citînd doar cîteva nume, mai e oare nevoie să amintim cît de mult s-au trudit Fresnel, Maxwell, Boltzmann, Einstein pentru a-și impune ideile menite, cu toate acestea, să deschidă fizicii imense perspective noi. Există aici destul material pentru ca inovatorii să fie apărați împotriva descurajării ce ar putea să le-o inspire lipsa de înțelegere de care se lovesc.

Coexistența undelor și particulelor

De mai bine de o jumătate de secol, cuvintele undă și particulă revin în mod constant în fizica cuantică. În 1905, făcînd o sinteză a vechilor

teorii corpusculare ale luminii, pe atunci abandonate, și a teoriilor ondulatorii ale lui Fresnel și Maxwell unanim adoptate, Albert Einstein a afirmat că în lumină există în același timp și unde și corpusculi, fotonii noștri de azi, și a dedus din ea interpretarea, pînă atunci imposibilă, a efectului fotoelectric. Cu aproape 20 de ani mai tîrziu, în 1923, eu am avut cutezanța de a extinde coexistența undelor și particulelor, presupunînd că nu numai fotonii de lumină, ci și toate celelalte particule materiale, cum sînt electronii, sînt însoțite de o undă. Pentru mine, așa cum a fost și ideea lui Einstein, nu era vorba de o vagă și puțin inteligibilă „dualitate", ci de o veritabilă *coexistență* a undei și particulei, amîndouă prezente în spațiul fizic și intim legate una de cealaltă. Dar, în timp ce concepția pe care am pus-o astfel la baza mecanicii ondulatorii a fost confirmată de lucrările matematice ale lui Erwin Schrödinger și de descoperirea experimentală a difracției electronilor, o nouă interpretare a dublului aspect, corpuscular și ondulatoriu, al luminii și al materiei se dezvolta datorită lucrărilor lui Niels Bohr, Max Born și ale tinerilor teoreticieni ai Școlii de la Copenhaga, interpretare care, s-ar putea spune, golea noțiunile de undă și de particulă de toată substanța lor.

Pentru a o demonstra, să începem cu unda. Ideea clasică clară și inteligibilă pe care o avem despre o undă este că ea e un proces fizic ce evoluează în spațiu în cursul timpului după o anumită ecuație de propagare. Firește, o astfel de undă are în fiecare punct, în fiecare moment, o amplitudine fizicește bine determinată și nu avem în nici un fel dreptul de a impune acestei amplitudini o valoare aleasă arbitrar. Or, în interpretarea actualmente ortodoxă a mecanicii ondulatorii, funcția de undă Ψ nu mai este decît o soluție a ecuației undelor (ecuația lui Schrödinger, în cazul cel mai simplu), a cărei singură semnificație este de a reprezenta probabilitatea rezultatului diverselor măsurători pe care le putem efectua pe corpuscul și, pentru ca

ea să poată juca acest rol, se determină arbitrar amplitudinea sa prin procedeul numit „normalizare". Unda Ψ din mecanica ondulatorie nu este așadar o undă fizică reală și proprietățile ei ridică paradoxuri îngrijorătoare. Mai întîi această undă apare ca determinînd fenomene fizice cum sînt: interferențe, difracție, energii ale stărilor staționare ale unui sistem cuantificat etc. Or, cum ar putea *determina* o simplă reprezentare de probabilități, care are în mod necesar un caracter subiectiv, fenomene fizice observabile ca și cum un simplu tabel de mortalitate ar putea fi cauza morților individuale? Prin ce stranie coincidență o reprezentare de probabilități ar putea să se propage în spațiu în cursul timpului ca o undă fizică reală, susceptibilă de a se reflecta, a se refracta, a se difracta?

Dar să trecem acum la corpuscul. Prin definiție, corpusculul este un mic obiect localizat permanent în spațiu și avînd o anumită structură. Or, după Max Born, ar trebui să admitem că corpusculul este prezent „în stare potențială" pe toată întinderea undei sale și această afirmație trebuie înțeleasă nu ca una ce exprimă prezența corpusculului în fiece clipă într-un punct necunoscut, ci omniprezența lui pe toată întinderea undei. O asemenea concepție mi se pare prea puțin inteligibilă. Cum s-ar putea concepe că un foton, ale cărui dimensiuni n-ar fi, pare-se, decît mai mici decît acelea ale unui atom, s-ar putea afla răspîndit într-un grup de unde luminoase a căror lungime este în general de ordinul metrului? Cum s-ar putea imagina că energia relativ considerabilă, transportată de un corpuscul, s-ar putea concentra brusc într-o regiune foarte mică, de exemplu cînd un foton ajungînd pe o foarte mică celulă fotoelectrică provoacă acolo ejecția unui electron? O concepție care nu folosește decît conceptul de undă omogenă (dealtfel, după cum am văzut, fictivă), fără nici o concentrare locală a energiei, nu poate explica realmente astfel de fenomene. Într-adevăr nu

avem dreptul să folosim cuvîntul corpuscul golindu-l de întregul lui sens. Dealtfel mi se pare că o asemenea concepție despre transportul energiei corpusculare este în totală contradicție cu teoria cîmpurilor și, ca urmare, ireconciliabilă cu înseși ideile pe care Einstein le-a pus la baza teoriei relativității[1]. Știu bine că în teoria cuantică a cîmpurilor se caută a se concilia cele două puncte de vedere prin introducerea numerelor de ocupare, dar cred, după cum voi explica mai departe, că este vorba aici de un „placaj", printr-un procedeu cu totul artificial, al conceptului, în sine foarte clar, de „număr de corpusculi" pe o imagine pur ondulatorie. Vom reveni mai departe asupra acestui punct.

Teoria dublei soluții și stadiul ei actual

Modul de a interpreta mecanica ondulatorie, care a devenit „ortodox", nu era deloc acela pe care îl aveam în minte în momentul cînd am conceput ideea ei de bază. Așa cum am mai spus, vedeam atunci că exista o veritabilă coexistență a undei și corpusculului, strîns legate unul de altul, unda și corpusculul fiind realități fizice definite în modul obișnuit. Fusesem deci nevoit să fac în acea epocă, 1926-27, un efort care era, desigur, insuficient pentru a obține o reprezentare de acest gen.

---

[1] Se vor putea compara ideile pe care le dezvoltăm aici cu foarte pătrunzătoarea obiecție făcută de Einstein împotriva folosirii exclusive a undei Ψ în mecanica ondulatorie (a se vedea: *Rapports et discussions du Ve Conseil Solvay de Physique* din octombrie 1927, Gauthier-Villars, Paris, 1928, p. 253—256). Einstein termina spunînd: „După părerea mea, această obiecție nu poate fi ridicată decît afirmînd că procesul nu este descris numai prin undă, ci că, în același timp, e localizat și corpusculul în undă în cursul propagării. Cred că d-l de Broglie are dreptate făcînd cercetări în această direcție. Dacă folosim exclusiv unda Schrödinger, interpretarea lui $|\Psi|^2$ implică după mine o contradicție cu postulatul de relativitate".

Primul lucru pe care îl aveam de făcut era de a restitui undei un caracter fizic concret pe care nu-l mai poseda unda Ψ, reprezentare abstractă de probabilitate, așa cum începea ea să fie considerată; dar mai trebuia explicat faptul cert că această undă Ψ, în ciuda caracterului ei fictiv, se propaga ca o undă reală. Am avut atunci ideea că trebuiau deosebite două unde, amîndouă fiind soluții ale ecuației de unde a mecanicii ondulatorii și, ca urmare, propagîndu-se în același mod, din care una pe care o numeam unda v ar fi o undă fizică avînd o amplitudine bine determinată, iar cealaltă, unda Ψ obișnuită, ar fi *calchiată* după unda v datorită relației $\Psi = Cv$, în care C ar fi un coeficient de normare. Normarea undei Ψ, menținîndu-i-se proprietățile de propagare a unei unde fizice, i-ar anula caracterul de realitate concretă. Astfel ar fi înlăturat paradoxul unei reprezentări de probabilitate care determină fenomene fizice observabile, fiindcă ele ar fi în realitate determinate de unda fizică v, iar nu de unda Ψ arbitrar calchiată după unda v, astfel încît să reprezinte probabilități fără a păstra un caracter fizic concret. La ora actuală această ipoteză mi se pare încă a fi singura care ne permite să înțelegem de ce unda Ψ uzuală a fost rînd pe rînd interpretată ca obiectivă sau ca subiectivă, după cum sînt considerate proprietățile sale de propagare care determină fenomene observabile sau caracterul său de simplă reprezentare de probabilități.

Trebuia să explic însă și existența corpusculului alături de aceea a undei, complicînd imaginea pe care mi-o furniza această „teorie a dublei soluții", așa cum am expus-o mai sus. Pentru aceasta am imaginat atunci (1927) că adevărata undă fizică, deși coincide aproape pretutindeni cu unda v, presupusă a avea o foarte slabă amplitudine, ar diferi de ea totuși într-o foarte mică regiune a spațiului unde ea ar prezenta o foarte mare amplitudine locală, regiune care ar constitui tocmai corpusculul legat de unda sa. Pe această undă am numit-o

unda u și presupuneam în fond că, în afara regiunii foarte mici singulare care constituie corpusculul, ea se reducea la unda v astfel încît se obținea, în acest caz, foarte aproximativ $u = v$. În cadrul ecuațiilor de unde liniare folosite în mod obișnuit, unda u ar apărea ca posedînd o singularitate în sens matematic (cu un punct în care amplitudinea ar fi infinită), dar ar putea fi altfel dacă s-ar admite că în regiunea singulară în care amplitudinea undei este foarte mare intervin termeni neliniari care nu figurează în ecuațiile uzuale.

Teoria dublei soluții astfel completată conduce la a se atribui corpusculului o traiectorie definită matematic ca fiind o linie ortogonală cu suprafețe de fază egală ale undei v. Acest fapt este exprimat printr-o formulă zisă „formula ghidării" care precizează în ce fel este ghidată mișcarea corpusculului de către propagarea undei. Ajungem astfel să înțelegem de ce probabilitatea prezenței corpusculului în punctul de coordonate x, y, z în momentul t e dată de pătratul modulului $|\Psi(x, y, z, t)|^2$ al funcției Ψ.

Totuși reflecțiile pe care le-am consacrat din nou teoriei dublei soluții de vreo 15 ani m-au făcut să-mi dau seama că această teorie sub forma ei veche și formula ghidării care decurge din ea nu sînt suficiente pentru a explica complet caracterul aleatoriu al manifestărilor corpusculare și intervenția constantă a probabilităților în previziunea lor. Aceasta e ceea ce m-a făcut să introduc treptat în concepția mea despre coexistența undelor și particulelor ideea că o particulă, chiar cînd ni se pare izolată, adică sustrasă oricărei interacțiuni exterioare, este totuși mereu în contact cu un mediu ascuns jucînd rolul unui fel de termostat, care schimbă cu ea continuu într-un mod aleatoriu energie și o cantitate de mișcare. Această idee a fost sesizată în 1954 de către Bohm și Vigier, care au emis atunci ipoteza existenței unui „mediu subcuantic" ascuns și subiacent. Dacă se adoptă acest punct de vedere, traiectoriile unei particule

definite prin formula ghidării nu mai apar decît ca traiectorii *medii* ca urmare a fluctuațiilor pe care le impune mișcării lor contactul permanent cu mediul subcuantic. Pe această bază nouă am putut dezvolta, începînd din 1960, o „termodinamică ascunsă a particulelor" despre care se va găsi mai jos (p. 129 și urm.) o expunere rezumativă. Această termodinamică constituie astăzi, după părerea mea, forma cea mai perfecționată a vechii mele teorii a dublei soluții și sînt convins că, atunci cînd i se va acorda atenția pe care o merită, ea va putea furniza unul din punctele de plecare pentru construirea unei noi interpretări, cu adevărat inteligibile, a fizicii cuantice.

În cele de mai sus am fost determinat, firește, să restabilesc imaginea clasică după care particula este un mic obiect localizat în spațiu, avînd o extensiune foarte mică, dar finită, și, ca urmare, o structură internă. Acesta e motivul pentru care timp de cîțiva ani am urmărit cu mult interes și simpatie lucrările lui Jean-Pierre Vigier și ale colaboratorilor săi, care caută să obțină o imagine spațio-temporală a particulelor de natură să reflecte ansamblul caracteristicilor (masă, sarcină electrică, spin, număr barionic, straneitate) pe care descoperirile succesive efectuate în acest domeniu ne-au determinat să le atribuim. Cred că încercările lor vor ajunge la o sinteză care va fi cu totul de acord cu teoria pe care am schițat-o mai sus, precum și cu ideile pe care le-am formulat cu vreo 30 de ani în urmă cînd, sprijinindu-mă pe datele încă foarte incomplete de care se dispunea atunci, am încercat să obțin o viziune unitară a constituției tuturor particulelor, considerîndu-le ca fiind formate din combinații diverse de unități de spin (metodă de fuziune)[1].

---

[1] A se vedea cartea mea: *Introduction à la nouvelle théorie des particules de M.J.-P. Vigier et de ses collaborateurs*, Gauthier-Villars, Paris, 1961. De atunci însă problema a progresat mult.

O observație a lui Einstein asupra formalismului uzual al mecanicii ondulatorii

Interpretarea curent admisă a mecanicii ondulatorii, abandonînd orice imagine clară a particulei, nu mai vrea să admită localizarea ei continuă în spațiu. Ea nu poate deci să-și reprezinte clar nici incidența unui foton pe o celulă fotoelectrică, nici aceea a unui electron pe un dispozitiv capabil de a o detecta. Ea nu poate nici să-și reprezinte ciocnirea a două particule venind în contact între ele. Din acest motiv, teoria interacțiunii între două particule prezintă un aspect singular, care a reținut atenția lui Einstein.

Să considerăm o particulă a cărei stare inițială de energie E_j este, conform formalismului uzual, reprezentată prin funcția $\Psi = c_j \varphi_j$ cu $c_j = 1$ în valoare absolută, φ_j fiind „funcția proprie" ce corespunde energiei E_j. Dacă particula este supusă în decursul unui timp limitat la un foarte slab cîmp perturbator datorat, de exemplu, apropierii unei alte particule, la sfîrșitul perturbării unda ei va fi devenit $\Psi = \Sigma c_k \varphi_k$ și, cum perturbarea a rămas foarte slabă, vom avea pentru c_j o valoare rămasă foarte apropiată de 1 și pentru toate c_k cu $k \neq j$ valori extrem de mici. Or, mecanica ondulatorie ne învață, într-un mod care pare cert, că dacă, la sfîrșitul perturbării, s-a putut produce un transfer de energie și de cantitate de mișcare între particula perturbatoare și particula perturbată, aceasta din urmă va avea în final o probabilitate $[c_j]^2$ foarte apropiată de unitate de a rămîne în starea sa inițială de energie E_j și probabilități foarte mici $|c_k|^2$ de a poseda o energie E_k diferită de E_j. Energiile E_k însă pot fi foarte diferite de E_j și de aici rezultă că perturbări foarte slabe pot determina apariția unor probabilități foarte mici pentru ca energia particulei considerate să fi suferit o schimbare importantă. Subliniind caracterul foarte surprinzător al acestei concluzii, Einstein considera că se obținea astfel o descriere *statistică* exactă a ceea ce se putea petrece, dar i se părea

necesar să substituie acestei descrieri statistice o descriere cauzală, cu toate că acest lucru îi păruse foarte greu.

În foarte remarcabila contribuție de la începutul cărții[1] consacrate celei de-a 60-a aniversări ale mele (Albin Michel, Paris, 1953), Einstein a reluat același argument sub o formă mai dezvoltată, dar i-a adăugat următoarea concluzie care mi se pare că permite sesizarea fondului gîndirii sale:

„Mi se pare însă că, în definitiv, se va recunoaște că în locul forței active, de exemplu energia potențială sau pentru efectul Compton cîmpul undei, trebuie pus ceva ce are o structură atomică la fel ca electronul însuși".

Cred că ideea emisă aici de Einstein este extrem de profundă, dar că este prezentată sub o formă poate puțin obscură. În consecință, voi încerca să desprind mai clar semnificația pe care ea o capătă în cadrul concepțiilor mele.

Să considerăm mai întîi o singură particulă pe unda sa v. Pentru mine unda v este un proces fizic foarte slab care nu propagă decît o energie nulă sau neglijabilă. Totuși acest fenomen foarte slab reglează, cel puțin în medie, abstracție făcînd de perturbațiile provenind din mediul subcuantic, deplasarea puternicei concentrări de energie care constituie particula. Incidența acestei puternice concentrări de energie ghidată de undă este aceea care produce efecte observabile cum sînt efectul fotoelectric sau impactul unui electron pe o țintă.

Să trecem acum la cazul examinat mai sus a două particule ale căror unde parvin în aceeași regiune a spațiului, ceea ce le va permite să interacționeze. După părerea mea, folosirea clasică în mecanica ondulatorie a spațiului configurațiilor, folosire despre care vom mai vorbi mai departe, ne dă, cel puțin cu aproximația newtoniană, o reprezentare *sărăcită* a propagării celor două unde v individuale în spațiul fizic. Or, pare bine stabilit că cele două particule sînt capabile să schimbe

[1] *Louis de Broglie physicien et penseur.*

brusc între ele, printr-un proces calificat drept „cuantic“ și declarat nedescriptibil de teoria ortodoxă, cantități finite de energie și de cantitate de mișcare într-un mod pe care compoziția spectrală a undei Ψ în spațiul configurațiilor îl permite să fie prevăzut, deoarece ea prevede probabilitățile diverselor procese cuantice posibile care asigură toată conservarea globală a energiei și a cantității de mișcare. Aici de asemenea avem deci de-a face cu un proces *foarte slab*, propagarea celor două unde v individuale în spațiul fizic (reprezentată într-un mod aproximativ prin aceea a undei în spațiul configurațiilor) care reglează, cel puțin statistic, procesul *puternic* al schimburilor de energie și de cantități de mișcare între cele două particule.

În cadrul concepțiilor mele, ideea profundă a lui Einstein mi se părea atunci a putea fi interpretată în modul următor. Particulele fiind presupuse localizate permanent în spațiu și animate de o mișcare aleatorie datorată superpoziției la ghidarea de către unda v a perturbărilor provenite din mediul subcuantic, ele pot la un anumit moment să se afle foarte aproape una de cealaltă și în acest caz se poate produce între ele o interacțiune intensă și bruscă, probabil cu caracter neliniar, constituind un „șoc“ cu caracter cuantic cu transfer notabil de energie și de cantitate de mișcare. Mi se pare că într-adevăr aceasta era ideea lui Einstein atunci cînd scria că, pentru a explica procesele puternice care transferă o energie importantă, trebuia înlocuită forța activă ce figurează în ecuația de unde uzuală prin ceva ce are o structură atomică.

Cred că, considerat în spațiul fizic, procesul de transfer de energie și de cantitate de mișcare prin șoc trebuie să consiste într-o „prindere“ bruscă a fiecăreia din cele două particule pe una dintre componentele monocromatice ale undei sale v cu conservarea globală a energiei și a cantității de mișcare. Ideile pe care le-am expus aici ar permite să se înțeleagă cum ar putea undele v, deși nu vehiculează practic nici o energie decelabilă, să regleze totuși nu numai localizările posibile ale par-

ticulelor, ci și transferurile importante de energie și de cantitate de mișcare care pot rezulta din „șocurile“ lor.

Teoria ortodoxă reprezintă destul de exact, pînă la un coeficient de normalizare, unda v asociată particulei. Aceasta e, după părerea mea, ceea ce îi permite să prevadă fenomenele și probabilitățile lor respective care sînt oarecum „prefigurate“ în structura însăși a undei. Cum însă această teorie refuză să introducă imaginea unor particule localizate, ea este total incapabilă să descrie procesele bruște de transfer de energie și de cantitate de mișcare ce se produc, de exemplu, în momentul efectului fotoelectric sau al ciocnirii între două particule. Ea este astfel nevoită să declare indescriptibile toate aceste procese cuantice care totuși intervin, pare-mi-se, în tot ce este observabil.

Alte observații critice

Vom mai face cîteva observații critice cu privire la metodele folosite astăzi în microfizica teoretică. Ne vom limita să le enunțăm destul de rapid, fără a le consacra dezvoltările lungi de care ele ar fi susceptibile.

În urma lucrărilor lui Schrödinger asupra dezvoltării matematice a mecanicii ondulatorii (1926), s-a admis că, pentru a trata o problemă în care intervin cîteva particule în interacțiune, trebuie luată în considerare propagarea unei unde Ψ nu în spațiul fizic, ci într-un spațiu abstract format cu ajutorul coordonatelor ansamblului particulelor (în principiu $3N$ coordonate a N particule). E ceea ce se numește spațiul configurațiilor. Folosirea acestui spațiu abstract nu ridică nici o dificultate în mecanica clasică unde punctele materiale presupuse bine localizate în spațiul fizic au coordonate bine definite și în care variațiile acestor coordonate în funcție de timp determină complet evoluția sistemului. Dar succesul previziunilor obținute în

mecanica ondulatorie prin metoda spațiului configurațiilor face să se uite, după cum mi se pare, ceea ce prezintă ea ca paradoxal în acest caz. Într-adevăr, cum se poate admite că *singura* reprezentare posibilă a interacțiunilor între cîteva particule trebuie să se facă într-un spațiu vizibil abstract cum e spațiul configurațiilor? Și dacă se admite odată cu interpretarea ortodoxă a mecanicii cuantice că particulele nu sînt în mod constant localizate în spațiu, cum se poate imagina un spațiu construit, chiar în mod abstract, pe ansamblul coordonatelor lor, de vreme ce în fond se admite că aceste coordonate nu există? Singura explicație posibilă a succesului acestei metode în mecanica ondulatorie mi se pare a fi că ea furnizează un fel de reprezentare a ceea ce se petrece în spațiul fizic în care se propagă unde transportînd particule localizate. Această reprezentare, care se arată foarte utilă pentru previziunile statistice, este totuși în mod necesar sărăcită, deoarece ea nu poate reprezenta propagarea undelor individuale în spațiul fizic. Cercetările continuate de mine în această direcție de cîțiva ani, precizate de analizele foarte pătrunzătoare ale lui Andrade e Silva, mă fac să cred că aici se află semnificația adevărată a succesului metodei spațiului configurațiilor așa cum a fost ea introdusă de Schrödinger în mecanica ondulatorie. E un subiect care se cere mai bine aprofundat, deoarece acest succes al metodei spațiului configurațiilor este una din obiecțiile cele mai frecvent opuse revenirii la descrierea fenomenelor în spațiul fizic pe care o preconizează teoria dublei soluții.

În lucrările în care este expusă interpretarea fenomenelor fizicii cuantice cu ajutorul ideilor Școlii de la Copenhaga se întîlnește mereu următoarea afirmație: aspectul corpuscular și aspectul ondulatoriu al unităților fizice nu pot fi niciodată observate în același timp, deoarece unul din aspecte dispare în măsura în care celălalt apare. S-a ajuns chiar să se afirme că particulele sînt entități fizice care iau pe rînd aspectul corpuscular și as-

pectul ondulatoriu. Expunînd ideile Şcolii de la Copenhaga, m-am lăsat eu însumi ispitit de reproducerea unora din aceste afirmaţii, astăzi însă îndelungatele mele reflecţii asupra acestui subiect mă conduc a crede că ele sînt complet inexacte. Într-adevăr, să examinăm înregistrarea pe o placă fotografică a franjelor de interferenţe pe care ştim acum să le obţinem tot atît de bine cu electroni ca şi cu fotoni. S-a putut verifica că incidenţa unei particule într-un punct al plăcii declanşează un mic fenomen local de ionizare provocînd apariţia unei pete negre pe negativ, însă observarea franjelor de interferenţe cere ca un număr foarte mare de particule să fi ajuns pe placă, deoarece apariţia franjelor rezultă nu direct din incidenţele individuale, ci din *repartiţia* statistică a acestor incidenţe pe placă. Se observă deci, în cursul experienţei, în acelaşi timp aspectul corpuscular, datorită faptului că impresiunile locale, ca dealtfel orice fenomen observabil, rezultă din incidenţa unei particule într-un punct, şi aspectul ondulatoriu, datorită faptului că repartiţia statistică a particulelor în spaţiu este reglată de propagarea undei. Nu este deci exact să se spună că unul din fenomene nu se poate produce decît în absenţa celuilalt şi e şi mai greşit să se spună că există o aceeaşi entitate fizică ce se prezintă cînd sub aspect corpuscular, cînd sub aspect ondulatoriu.

Un alt punct asupra căruia este util să atragem atenţia e faptul că pentru majoritatea teoreticienilor actuali unda (sau cel puţin ceea ce rămîne din ea în concepţiile lor) este aproape totdeauna considerată ca o undă plană monocromatică avînd o frecvenţă bine determinată, ceea ce permite să i se atribuie particulei (sau cel puţin ceea ce rămîne din ea în acest mod de a vedea) o energie bine determinată de relaţia cuantei $W = h\nu$. Or, nu mi se pare îndoielnic ca într-o teorie a undelor exactă din punct de vedere fizic să nu existe niciodată unda plană monocromatică, deoarece ea

ar avea o durată în timp și o extensiune în spațiu amîndouă infinite, ceea ce nu e de conceput. În realitate avem totdeauna de-a face cu grupuri de unde a căror emisie are un început și un sfîrșit și știm foarte bine că un asemenea grup de unde are totdeauna o lărgime spectrală $\delta\nu$ aproximativ egală cu inversul duratei sale de emisie τ, astfel încît el nu este niciodată strict monocromatic.

Considerarea exclusivă a undelor monocromatice conduce la o altă concepție care mi se pare eronată. Dacă se ia în considerare o mărime care poate fi reprezentată, în maniera lui Fourier, printr-o superpoziție de componente monocromatice, superpoziția e aceea care are un sens fizic, iar nu componentele lui Fourier considerate izolat. Dacă, de exemplu, avem de-a face cu o coardă vibrantă, a cărei mișcare poate fi reprezentată printr-o superpoziție de armonice, filmul acestei mișcări ne va arăta că în fiecare moment coarda are o formă foarte complicată care variază neîncetat în cursul timpului, pe baza unei legi complexe. În această mișcare nimic nu ne permite să distingem diversele componente monocromatice: aceste componente nu există decît în mintea teoreticienilor, care caută să facă o analiză abstractă a acestei mișcări și ele nu ar căpăta o existență fizică decît dacă s-ar izbuti izolarea lor printr-o operație care, evident, ar rupe superpoziția. Dealtfel, toată teoria interferențelor ar fi inexactă dacă nu ar fi așa. Ideea că componentele monocromatice au o existență reală în procesul fizic care rezultă din superpoziția lor mi se pare o idee greșită care viciază o parte a raționamentelor teoretice actualmente uzuale în fizica cuantică, dar nu pot expune aici toate consecințele pe care această iluzie le-a putut antrena.

Pentru a termina, aș dori să mai spun cîteva cuvinte în legătură cu „teoria cuantică a cîmpurilor", care a reușit, cu vreo 20 de ani în urmă, să furnizeze o explicație a cîtorva rezultate experimentale remarcabile, care a cunoscut apoi o foarte

mare vogă, dar la ora actuală pare să fi intrat într-o perioadă de sterilitate. În forma sa cea mai naturală teoria cuantică a cîmpurilor face să intervină corpusculii (fotonii în cazul luminii) introducînd noțiunea de „număr de ocupare". Numărul de ocupare al unei unde plane monocromatice este, în fond, numărul de corpusculi pe care ea îi transportă. Se va observa că această definiție este foarte clară dacă se admite că o undă transportă întotdeauna un număr, firește întreg, de corpusculi localizați, dar că devine foarte obscură dacă nu se mai vrea să se admită imaginea corpusculilor localizați. Abandonînd apoi ceea ce rămînea ca sens fizic în concepția anterioară a undei Ψ, teoria cuantică a cîmpurilor împinge abstracția pînă la considerarea amplitudinii unei unde monocromatice nu ca o mărime numerică, ci ca un „operator" care operează în spațiul discontinuu al numerelor de ocupare. Proprietățile de comutare ale acestor operatori constituie esențialul formalismului acestei teorii, despre care este într-adevăr aproape imposibil să credem că poate să ne furnizeze o veritabilă reprezentare a realității fizice. Cu toate acestea se scot din ea un fel de „rețete" care permit în multe cazuri previziuni statistice exacte. Cu toată voga pe care o are încă, mie personal mi se pare cert că teoria cuantică a cîmpurilor va fi într-o bună zi înlocuită printr-o reprezentare mult mai profundă și mult mai exactă a proceselor microfizice. La sfîrșitul uneia dintre ultimele reeditări ale cărții sale *The Meaning of Relativity*, Einstein, făcînd aluzie la teoria cuantică a cîmpurilor, scria: „Actualmente prevalează opinia că teoria cîmpurilor trebuie mai întîi transformată prin cuantificare într-o teorie statistică după reguli mai mult sau mai puțin bine stabilite. *Nu văd în această metodă decît o încercare de a explica relații care au un caracter neliniar cu ajutorul unei teorii liniare*". Concluzia lui Einstein mi se pare a fi cu totul în acord cu ansamblul ideilor pe care le-am dezvoltat în această expunere.

Concluzia mea va fi deci că interpretările actuale ale fizicii cuantice vor trebui să fie înlocuite în viitor prin idei teoretice care ne vor da imagini mai complete și mai clare ale realității microfizice. Cred că teoria dublei soluții și termodinamica ascunsă a particulelor, chiar sub forma lor actuală, desigur încă imperfectă, ne oferă de pe acum o idee a ceea ce ar putea fi fizica cuantică de mîine.

Descoperirile uimitoare care, de o jumătate de secol, s-au înmulțit într-un mod atît de prodigios, au îndemnat pe teoreticienii fizicii să construiască formalisme relativ simple, care să le permită să traducă faptele experimentale și să le prevadă cu o anumită siguranță. Acest lucru era legitim și practic foarte util. Însă obișnuința de a folosi cu precizie și ingeniozitate „rețete" cu caracter pur formal, cred că i-a făcut să uite cam prea mult că dorința de a înțelege și de a-și reprezenta clar realitatea fizică a fost totdeauna și va rămîne fără îndoială totdeauna scopul cel mai înalt și efortul în cele din urmă cel mai fructuos al cercetării științifice fundamentale.

De cîțiva ani cunoștințele noastre asupra numărului, a proprietăților și a avatarurilor particulelor au crescut neîncetat în mod prodigios. Dacă ideile pe care le-am schițat sînt exacte, orice particulă și unda care o poartă ar emerge, s-ar putea spune, în universul microfizic observabil, la „suprafața" mediului subcuantic, enorm rezervor de energie ascunsă. Evoluția și interacțiunile particulelor observabile, transformările posibile ale unora în altele, apariția și dispariția fotonilor, toate acestea ne vor apărea poate într-o bună zi ca rezultatul la nivel microfizic, pe care îl putem observa indirect, al tuturor imenselor posibilități pe care le deține mediul subcuantic.

M-am gîndit să pun ca epigraf la prezenta expunere următoarea frază curioasă: „Izvorul dezaprobă aproape întotdeauna itinerarul fluviului", pe al cărei autor nu-l cunosc. Într-adevăr, Planck, Einstein, Schrödinger și eu însumi nu am dezaprobat oare noi totdeauna, mai mult sau mai puțin, modul în care au fost interpretate fizica cuantelor, coexistența undelor și particulelor și mecanica ondulatorie, aceste fluvii imense care își au izvorul în lucrările noastre?

Expuneri ştiinţifice recente

1961—1965

FENOMENELE FOTOELECTRICE

Fizicienii au ezitat mult timp între o reprezentare corpusculară și o reprezentare ondulatorie a *luminii*. La începutul secolului al XIX-lea, în urma lucrărilor lui Augustin Fresnel, toți s-au raliat în cele din urmă reprezentării ondulatorii care, reinterpretată convenabil, a fost apoi încorporată în teoria electromagnetică a lui Maxwell. Succesele repurtate de teoria ondulatorie a luminii în previziunea detaliată a tuturor fenomenelor celor mai fine ale opticii fizice duseseră la abandonarea completă de către știința de la sfîrșitul secolului al XIX-lea a oricărei idei privind constituția granulară a luminii.

Descoperirea de către Hertz, în 1887, a efectului fotoelectric a stat la originea unei anumite întoarceri la concepția unei structuri discontinue a luminii. Efectul fotoelectric constă în esență în faptul că o lamă metalică iradiată de lumina cu o lungime de undă destul de scurtă este susceptibilă de a emite în exterior electroni, numiți adeseori fotoelectroni. Studiul efectului fotoelectric a evidențiat treptat următoarele trei fapte: 1) un metal lovit de o radiație monocromatică de frecvența ν nu emite fotoelectroni decît dacă frecvența ν este superioară unei frecvențe de prag ν_0 caracteristică metalului; 2) energia cinetică a electronilor emiși, pe care o vom desemna prin T, crește propor-

ţional cu diferenţa $\nu - \nu_0$ dintre frecvenţa radiaţiei incidente şi frecvenţa de prag, astfel încît se obţine o relaţie de forma

$$T = h(\nu - \nu_0) = h\nu - W_0 \qquad (\text{cu } W_0 = h\nu_0)$$

unde h este o constantă a cărei valoare numerică, atunci cînd a putut fi măsurată exact, s-a dovedit egală cu aceea a faimoasei constante h introdusă de Planck în teoria radiaţiei corpului negru datorită ipotezei cuantelor; 3) numărul electronilor emişi pe secundă este proporţional cu intensitatea undei luminoase incidente.

Imposibilitatea de a interpreta aceste trei legi experimentale cu ajutorul concepţiilor clasice ale teoriei ondulatorii a luminii l-a determinat pe Albert Einstein în 1905 să reintroducă o structură discontinuă a radiaţiilor sub forma nouă a ipotezei „cuantelor de lumină". Inspirîndu-se din ideile lui Planck asupra cuantelor, Einstein admite că în orice undă luminoasă de frecvenţa ν energia este concentrată în corpusculi de energie $h\nu$, unde h este constanta lui Planck; Einstein numea aceşti corpusculi „cuante de lumină", noi le numim astăzi *fotoni*. Iată cum, cu ajutorul ipotezei sale, Einstein a putut interpreta legile efectului fotoelectric. Electronii liberi de conducţie, care sînt conţinuţi într-un metal şi care explică proprietăţile lui de conductor, nu pot ieşi în exterior decît dacă cheltuiesc un anumit *lucru de ieşire* W_0, caracteristic pentru metalul considerat. Putem astfel defini pentru fiecare metal o frecvenţă de prag ν_0 prin relaţia

$$\nu_0 = \frac{W_0}{h}$$

în care h este constanta lui Planck. Dacă un foton de energie $h\nu$ ajunge pe un metal, el va putea ceda energia lui unui electron liber, dar acest electron nu va putea, evident, să fie emis în exteriorul metalului decît dacă vom avea $h\nu > W_0$, adică $\nu > \nu_0$. Astfel este explicată prima lege experimentală a efectului fotoelectric relativă la existenţa unei

frecvențe de prag caracteristice pentru metalul fotoemisiv. În plus, dacă ν este superioară lui ν_0, electronul va ieşi din metal cu o energie cinetică T egală cu $h\nu - W_0 = h(\nu - \nu_0)$ şi astfel este dedusă foarte simplu a doua lege experimentală a efectului fotoelectric. În ceea ce priveşte a treia lege experimentală, ea rezultă din faptul că întîlnirea între un foton incident şi un electron liber al metalului este un fenomen individual cu caracter aleator.

Existența fotonilor, pe care interpretarea de către Einstein a legilor efectului fotoelectric părea deja să o facă certă, a fost confirmată prin descoperirea ulterioară a efectului Compton şi a efectului Raman, apoi prin toate dezvoltările succesive ale fizicii cuantice contemporane. Ea a demonstrat existența unui dublu aspect, corpuscular şi ondulatoriu totodată, al luminii şi al tuturor radiațiilor. Mai tîrziu, mecanica ondulatorie a venit să ne arate că acest dublu aspect există pentru electroni şi pentru toate particulele scării atomice. Deşi formalismele folosite actualmente în fizica cuantică traduc în mod satisfăcător acest dublu aspect, nu este poate sigur că ele ne fac să pătrundem veritabila natură fizică a acestuia.

Efectul fotoelectric prezintă, precum am văzut adineauri, un interes considerabil din punctul de vedere al concepțiilor generale ale fizicii teoretice, dar el se pretează şi la un foarte mare număr de aplicații tehnice dintre cele mai importante. Dispozitivul cel mai folosit în aceste aplicații este celula fotoelectrică. Ea este constituită dintr-un balon de sticlă vid sau umplut cu gaz, în care se află un catod fotoemisiv susceptibil să emită electroni cînd este lovit de o lumină de frecvență suficient de înaltă: în balon se află de asemenea un anod adus la o tensiune pozitivă în raport cu fotocatodul, astfel încît fluxul electronilor se închide în exteriorul celulei mergînd de la anod la catod. Fotocatodul este întotdeauna constituit dintr-un strat de metal alcalin depus pe un suport şi uneori aliat cu un alt

metal: prepararea acestor fotocatozi este o tehnică extrem de delicată. În funcție de natura metalului alcalin fotoemițător, frecvența de prag este mai mult sau mai puțin ridicată. Anumite celule își au frecvența de prag situată spre extremitatea violetă a spectrului și ele nu funcționează decît în violet sau ultraviolet: altele, cum sînt cele foarte uzuale în care fotocatodul este format dintr-un strat de cesiu depus pe un suport de oxid de argint, au o frecvență de prag mai joasă și funcționează aproape în întreg spectrul vizibil; e posibil chiar, cu ajutorul anumitor artificii, să se obțină celule cu cesiu a căror frecvență de prag este și mai joasă și care funcționează deja în infraroșul apropiat.

Nu putem enumera aici multiplele aplicații ale celulelor fotoelectrice. Vom reaminti numai că ele sînt foarte utilizate pentru măsurarea și compararea intensităților luminoase și că, prin procedee care derivă toate din iconoscopul lui Zvorîkin, ele joacă un rol esențial în transmiterea imaginilor prin televiziune.

Curentul obținut direct cu ajutorul unei celule fotoelectrice este întotdeauna destul de slab, în general de ordinul a cîțiva microamperi pe lumen, și nu poate depăși circa două sute cincizeci de microamperi pe lumen în cazurile cele mai favorabile. Dar, proiectînd fotoelectronii produși de o celulă asupra unui multiplicator de electroni, se poate obține o amplificare a curentului electronic, care poate atinge sau depăși un milion. Această combinație a celulei fotoelectrice și a multiplicatorului de electroni permite astfel să se pună în evidență incidența unei lumini extraordinar de slabe care, fără acest dispozitiv, ar scăpa oricărei observații. Tot folosirea acestei combinații, asociată cu diversele artificii preluate din optica electronică, i-a permis lui André Lallemand să realizeze telescopul său electronic și să efectueze astfel cu telescoape de dimensiuni mijlocii observații foarte frumoase care, altfel, nu ar fi fost posibile decît cu ajutorul unor instrumente mult mai puternice și mai costisitoare.

Funcționarea celulelor fotoelectrice despre care am vorbit se bazează pe efectul fotoelectric așa cum a fost el definit mai sus. Se atribuie de asemenea denumirea de celule fotoelectrice (ceea ce creează puțină confuzie) și altor dispozitive a căror funcționare ține de alte fenomene legate de proprietățile semiconductorilor. Acestea sînt, pe de o parte, *pilele fotoelectrice* care folosesc *efectul fotovoltaic* și, pe de altă parte, celulele *fotoconductoare.*

În *semiconductori* electronii dețin stări de energie foarte puternic legate de structura corpului, dar acești electroni sînt susceptibili să treacă destul de ușor în stări mult mai puțin legate în care ei devin electroni de conducție, în timp ce în stările legate apar lipsuri de electroni, „goluri". Aceste împrejurări fac ca semiconductorul să fie mult mai rezistent decît un conductor și mult mai puțin rezistent decît un izolator. Cînd un semiconductor este iluminat, fotonii incidenți, producînd un fel de efect fotoelectric intern, pot provoca trecerea anumitor electroni dintr-o stare foarte legată într-o stare mai liberă și să modifice astfel proprietățile electrice ale semiconductorului.

Efectul fotovoltaic folosit în fotopile constă în următorul fapt: cînd un strat subțire al unui semiconductor, cum e seleniul, se află în contact cu un metal care îi servește ca suport, o radiație incidentă provoacă, prin efectul fotoelectric intern despre care am vorbit adineauri, apariția între semiconductor și metal a unei diferențe de potențial astfel încît ansamblul dispozitivului poate juca rolul unei pile care funcționează sub acțiunea luminii. O pilă fotoelectrică bună pe bază de seleniu poate furniza în circuitul său exterior un curent de ordinul unui miliamper pe lumen și are astfel un randament sensibil superior aceluia al celulelor fotoemisive studiate mai înainte. Pilele fotoelectrice au căpătat numeroase aplicații practice care se bazează în general pe principiul următor: o pilă fotoelectrică iluminată de un fascicol de lumină care debitează un curent continuu în circuitul său exterior, dacă un corp opac întrerupe fasciculul de

lumină, curentul debitat de pilă se anulează și această variație de curent poate fi folosită pentru scopurile pe care ni le propunem. Una dintre aplicațiile cele mai cunoscute ale pilelor fotoelectrice este punerea în mișcare automată, în anumite stații ale metroului, a scărilor rulante atunci cînd o persoană se prezintă la capătul uneia din aceste scări.

Din explicațiile date mai sus rezultă că, dacă un semiconductor este supus acțiunii luminii, conductivitatea sa crește. Acesta este principiul celulelor fotoconductoare. Dacă o celulă fotoconductoare pe bază de seleniu este intercalată într-un circuit branșat la bornele unui electromotor și străbătut de un curent electric, acest curent va varia după cum celula e mai mult sau mai puțin luminată. Celulele fotoconductoare au și ele numeroase aplicații și servesc în special, în cinematograful sonor, la „citirea" cuvintelor înregistrate sub forma unei înnegriri variabile pe „pista sonoră" care însoțește filmul.

Din exemplele date se vede cît de numeroase și importante sînt aplicațiile practice ale diverselor feluri de fenomene fotoelectrice care rezultă toate din existența fotonilor.

DISPOZITIVE CU SEMICONDUCTORI[1]

Domnule ministru, doamnelor, domnilor,

În toate domeniile de aplicații ale științei, cercetările științei fundamentale și realizările tehnicii au fost întotdeauna strîns legate și și-au furnizat reciproc în mod constant concepțiile și dispozitivele fără de care ele nu ar fi putut progresa. Acest lucru apare cu deosebire vizibil în domeniul care va face obiectul lucrărilor Colocviului internațional ce se deschide astăzi. Studierea și folosirea proprietăților semiconductorilor s-au dezvoltat foarte rapid de circa 15 ani datorită unei colaborări deosebit de fecunde a efortului științific și a efortului tehnic. De aceea este interesant să facem, în această primă ședință a colocviului dumneavoastră, un scurt istoric al dezvoltării fizicii semiconductorilor.

Chiar de la începuturile științei moderne a electricității s-a observat că existau două categorii de corpuri care se opuneau clar unul altuia în ceea ce privește aptitudinea lor de a se lăsa străbătute de curentul electric: pe de o parte, conductorii, pe de alta — izolatorii. Conductorii, printre care metalele uzuale, cum e cuprul, sînt exemple tipice, au o rezistivitate foarte slabă, de ordinul cîtorva milionimi de ohmi-centimetru, în timp ce rezistivitatea izolatorilor atinge ușor 10^{15} ohmi-centimetru. Între

[1] Discurs ținut la ședința de deschidere a Colocviului asupra semiconductorilor (20 februarie 1961).

aceste două categorii de corpuri cu proprietăți de conducție electrică atît de opuse, există intermediari ca germaniul, siliciul etc., ale căror rezistivități pot varia de la cîțiva ohmi-centimetru la cîteva milioane de ohmi-centimetru. Aceste corpuri, față de care multă vreme electricienii manifestau prea puțin interes, sînt semiconductorii, astăzi la loc de onoare.

Cînd, la sfîrșitul ultimului veac, fizicienii au căutat să interpreteze trecerea electricității prin corpurile conductoare, ei au recurs la teoria electronilor pe care H.A. Lorentz o dezvoltase de curînd, pe baze ce păreau foarte satisfăcătoare. Experiența dovedise existența unor electroni negativi și începuse să se știe că atomii erau edificii conținînd electroni la periferia lor. În acest caz era ispititor să se presupună că în metalele conductoare electronii cei mai periferici ai atomilor, aceia care astăzi sînt denumiți „electroni de valență", sînt susceptibili să evadeze cu ușurință din atomi și să formeze în interiorul structurii metalului un fel de „gaz de electroni liberi", căruia i se putea aplica mecanica statistică a lui Boltzmann-Gibbs ce-și demonstrase cu atîta strălucire valoarea în teoria cinetică a gazelor. Dacă în metal nu există nici un cîmp electric, electronii vor fi animați de o agitație termică proporțională cu temperatura metalului, dar întotdeauna complet dezordonată: de aici nu va rezulta nici o mișcare de ansamblu a electronilor, deci nici un curent în conductor. Dacă, dimpotrivă, conductorul este supus unui cîmp electric, o mișcare de ansamblu se va suprapune mișcării de agitație dezordonată a electronilor și va apărea un curent electric. Tocmai pe baza acestor idei Drude și, mai riguros, Lorentz însuși au construit, în urmă cu peste o jumătate de secol, teoria electronică a metalelor. Ea explica conductibilitatea electrică, precum și conductibilitatea termică a metalelor și interpreta cîteva aspecte ale acestor fenomene, dar se lovea totuși de grave dificultăți în privința valorii căldurilor specifice ale metalelor și a formei exacte a legii Wiedemann-

Franz. Aveai impresia că ideea de a explica conductibilitatea conductorilor prin deplasări de electroni prin structura acestora era exactă, dar că teoria lui Drude-Lorentz nu era încă decît o aproximare destul de rudimentară.

În jurul anului 1930 dezvoltarea mecanicii ondulatorii și descoperirea principiului de excluziune al lui Pauli și a statisticii lui Fermi-Dirac legată de acesta au dat teoriei conductibilității metalelor o orientare cu totul nouă. Sommerfeld e cel care a observat atunci că electronii, fiind fermioni, ascultă de statistica lui Fermi-Dirac și că, în condițiile uzuale de temperatură, electronii liberi dintr-un metal sînt într-o stare de „degenerescență", astfel încît folosirea statisticii clasice a lui Boltzmann-Gibbs în teoria electronică a metalelor nu este deloc justificată. Această teorie trebuia deci reluată substituind statisticii clasice pe aceea a lui Fermi-Dirac și astfel Sommerfeld și primii săi continuatori au putut ameliora considerabil vechea teorie a lui Drude-Lorentz.

Dar, chiar și așa, problema nu era încă tratată în toată complexitatea ei și nu apărea limpede cum se opera trecerea de la izolatori la conductori. Pentru a putea înainta mai departe, aici a trebuit să se intervină cu concepțiile mecanicii ondulatorii. Într-adevăr, într-un corp cu structură cristalină atomii sînt repartizați uniform în rețeaua cristalină și, dacă electronii de valență care evadează din structura internă a atomilor devin electroni liberi, atomii rămași, care sînt electrizați pozitiv, creează în interiorul corpului un potențial periodic în sînul căruia se pot deplasa electronii liberi. Dar, conform ideilor mecanicii ondulatorii, mișcarea acestor electroni liberi depinde de propagarea undei lor asociate și în acest caz se pune problema de a determina soluțiile ecuației de unde a lui Schrödinger într-un mediu cristalizat, în care potențialul variază periodic în spațiu. Studiul acestei probleme complicate a condus la următoarele concluzii: există intervale de valoare ale frecvenței

undei, adică ale energiei electronului asociat, pentru care propagarea undei în mediul cristalizat este posibilă, dar există și intervale de valoare ale energiei electronului pentru care propagarea undei este imposibilă. Există, așadar, pentru energia electronului „benzi" de valori „permise" și benzi de valori „interzise". Această teorie a fost studiată foarte aprofundat de Léon Brillouin în Franța și de aceea pe bună dreptate i se atribuie numele de „teoria zonelor a lui Brillouin".

Considerațiile pe care le-am schițat mai sus au permis să se interpreteze într-un mod mult mai precis proprietățile de conductibilitate ale conductorilor și izolatorilor. Într-adevăr, electronii de valență care au scăpat din legăturile atomice vin în mod normal să ocupe banda permisă de energie minimă care, din acest motiv, este denumită „bandă de valență". Deasupra acestei benzi de valență în scara energiilor se află o bandă interzisă, mai mult sau mai puțin largă, în funcție de natura corpului considerat, apoi, deasupra acestei benzi interzise, o nouă bandă permisă care e denumită „bandă de conducție". Într-un corp în care agitația termică este foarte slabă (ea ar fi riguros nulă la zero absolut), toți electronii de valență se plasează în banda de valență care este astfel saturată: se poate demonstra că, dacă în corp este creat atunci un cîmp electric, nu rezultă de aici nici o mișcare de ansamblu a electronilor, astfel încît corpul, chiar dacă aparține categoriei conductorilor, se comportă ca un izolator. Dar, dacă temperatura se ridică, unii electroni vor putea, prin excitație termică, să părăsească banda de valență, să treacă peste banda interzisă și să ajungă în banda de conducție. Electronii care vor fi trecut astfel în banda de conducție vor lăsa pe banda de valență locuri libere, viduri, denumite „goluri", și se demonstrează că aceste „goluri" se comportă exact ca niște electroni a căror sarcină pozitivă ar fi egală și opusă aceleia a electronului real. Dacă atunci în corp se stabilește un cîmp electric, electronii din banda de conducție vor fi atrași într-un

sens, golurile din banda de valență în celălalt sens și, în principiu, trebuie să apară un curent electric.

Cum ne permit aceste concepții noi să interpretăm deosebirea dintre proprietățile conductorilor și ale izolatorilor? Pentru aceasta, trebuie să remarcăm că banda interzisă care desparte banda de valență de banda de conducție poate, în funcție de natura corpului, să fie mai mult sau mai puțin largă. Pentru anumite corpuri ea va fi foarte îngustă și va corespunde, de exemplu, unei mici fracțiuni de electron-volt. În acest caz, chiar la o temperatură puțin ridicată, mulți electroni vor putea traversa, datorită efectului termic, această bandă interzisă și atinge banda de conducție determinînd astfel apariția golurilor în banda de valență: sub influența unei diferențe de potențial chiar slabe, se va produce un curent, prin urmare corpul este un conductor. În alte corpuri banda interzisă va fi foarte largă, grosimea ei putînd atinge cîțiva electron-volți: practic nici un electron nu va putea traversa, datorită efectului termic, această largă zonă interzisă și, chiar dacă e supus unei diferențe de potențial ridicate, corpul nu va putea lăsa să treacă nici un curent apreciabil: el va fi deci un izolator.

Ca urmare, e ușor de imaginat un caz intermediar care să corespundă existenței semiconductorilor, cum ar fi oxidul cupros, germaniul, seleniul, siliciul etc. Pentru aceste corpuri banda interzisă nu este nici foarte îngustă, nici foarte largă, deoarece grosimea ei este de ordinul unui electron-volt: conductibilitatea lor este în acest caz mult mai slabă decît aceea a conductorilor, fiind totodată mult mai mare decît aceea a izolatorilor. Totuși, dacă semiconductorul este foarte pur (se spune atunci că avem de-a face cu un semiconductor intrinsec), conductibilitatea rămîne foarte slabă și din acest motiv proprietățile acestor corpuri nu au reținut la început decît destul de puțin atenția fizicienilor și tehnicienilor.

Situația s-a schimbat în urma ultimului război, în cursul căruia trebuiau folosite, în special în dispozitivele radar, emisiuni radioelectrice de foarte înaltă frecvență. Or, se știe că pentru emisia, amplificarea și detectarea frecvențelor foarte înalte folosirea tuburilor clasice cu mai mulți electrozi devine foarte grea, dacă nu imposibilă. În consecință a fost necesar să se folosească pentru redresarea, în postul receptor, a oscilațiilor de foarte înaltă frecvență un dispozitiv comportînd un cristal de siliciu pe care se sprijină puternic un vîrf metalic. Folosirea acestui dispozitiv constituie una din acele curioase reveniri în urmă care au fost destul de frecvent observate în istoria radioelectricității în decurs de 70 de ani, deoarece acest gen de redresor prezintă o mare analogie cu bătrîna „galenă" care era folosită în mod curent în aparatele de radiorecepție pe la 1910 și care a lăsat în memoria oamenilor din generația mea amintiri foarte vechi. Folosirea detectorului cu siliciu a readus, fără îndoială, în atenția fizicienilor și tehnicienilor posibilitatea de a obține cu semiconductori dispozitive redresoare analoge diodei lui Fleming și, la modul mai general, perspectivele pe care le putea deschide înlocuirea tuburilor clasice cu mai mulți electrozi prin dispozitive cu semiconductori.

Dar, precum am mai menționat, semiconductorii riguros puri au o conductibilitate intrinsecă destul de slabă și nu prezintă un interes deosebit. Nu același lucru se întîmplă cu semiconductori în care sînt introduse în cantități infinitezimale, dar foarte exact dozate, „impurități", adică atomi care nu aparțin structurii cristaline normale a semiconductorului. Dacă acești atomi sînt susceptibili de a ceda cu ușurință unul dintre electronii lor semiconductorului, ceea ce pentru semiconductorii uzuali cum sînt germaniul sau siliciul este cazul atomilor de azot, de fosfor, de arsen, de antimoniu, electronii cedați structurii cristalului de către acești atomi „donori" ating cu ușurință banda de conducție, iar semiconductorul, care conține numeroși electroni în banda sa de conducție, prezintă o con-

ductibilitate relativ mare: avem de-a face în acest caz cu un semiconductor de tipul *n* în care electronii sînt purtătorii sarcinii majoritare. Dacă, dimpotrivă, atomii de impuritate introduşi în semiconductor sînt susceptibili de a-şi încorpora cu uşurinţă electroni venind din exterior (atomi „acceptori"), ceea ce e cazul la semiconductorii uzuali pentru bor, aluminiu, galiu, indiu etc., aceşti atomi de impuritate vor sustrage cu uşurinţă electroni benzii de valenţă şi vor determina în ea apariţia unui mare număr de „goluri" echivalente unor sarcini pozitive care vor putea să se deplaseze uşor în banda de valenţă: semiconductorul va prezenta şi în acest caz o conductibilitate relativ mare, dar acesta va fi un semiconductor de tipul *p* în care purtătorii sarcinii majoritare vor fi „golurile" echivalente unor sarcini pozitive. Astfel sînt interpretate proprietăţile celor două tipuri *n* şi *p* de semiconductori într-un mod care a ghidat întreaga dezvoltare a tehnicii în acest domeniu.

Sîntem acum în măsură să interpretăm o diferenţă de proprietăţi între conductori şi semiconductori, diferenţă despre care nu am vorbit pînă acum. Pentru aceste două categorii de corpuri conductibilităţile nu numai că sînt de un ordin de mărime foarte diferit, dar, în afară de aceasta, variază într-un mod cu totul opus în raport cu temperatura. După regula clasică, rezistenţa unui conductor creşte destul de puternic odată cu temperatura; din contră, rezistenţa unui semiconductor scade foarte repede cînd temperatura sa creşte. De unde vine această diferenţă flagrantă a variaţiei termice a conductibilităţilor? Aceasta se constată uşor în felul următor. În cazul unui conductor, creşterea temperaturii, provocînd trecerea electronilor din banda de valenţă în banda de conducţie, măreşte numărul electronilor în cea dintîi şi numărul „golurilor" în cea de-a doua, ceea ce înlesneşte trecerea curentului electric; dar, în acelaşi timp, creşterea agitaţiei termice creează un obstacol pentru mişcarea de ansamblu a purtătorilor de sarcină, ceea ce tinde să sporească rezis-

tența și, întrucît acest al doilea efect îl depășește pe primul, rezistența conductorului crește odată cu temperatura. În cazul semiconductorilor, creșterea agitației termice odată cu temperatura tinde de asemenea, ca și în cazul precedent, să mărească rezistența; aici însă cedarea de electroni de către atomii „donori" benzii de conducție sau captarea de electroni de către atomii „acceptori" în detrimentul benzii de valență, care corespund unor tranziții de diferență mică de energie, sînt considerabil mărite prin ridicarea temperaturii și, întrucît acest al doilea efect îl depășește mult pe primul, rezistența semiconductorului descrește rapid cînd temperatura se ridică. Variația rapidă a rezistenței semiconductorilor în funcție de temperatură a dat naștere tehnicii „termistorilor", ale căror numeroase utilizări nu le voi menționa aici.

„Termistorii" nu sînt decît una dintre categoriile, foarte numeroase de dispozitive, care folosesc astăzi semiconductori. Printre aceste dispozitive cele mai importante sînt fără îndoială „tranzistorii". Tranzistori cu vîrf, tranzistori-joncțiune, de tipul *pnp* sau *npn* sau de tip și mai complicat, au astăzi nenumărate aplicații în toate domeniile electronicii, și anume în calculatoarele electronice și în aparatele de radiorecepție. Dispozitiv solid, foarte comod și care nu necesită un curent de încălzire important, tranzistorul, în ciuda unor inconveniente pe care progresele tehnicii contribuie să le atenueze, tinde tot mai mult să înlocuiască în numeroase cazuri tuburile clasice cu mai mulți electrozi care, atît de răspîndite și atît de bine puse la punct astăzi, încep cu toate acestea să piardă teren în favoarea minusculilor lor concurenți: tranzistorul a făcut posibilă realizarea acelor aparate de radio portative cărora marele public, confundînd partea cu întregul, le dă deseori greșit numele global de „tranzistori".

Folosirea semiconductorilor a permis de asemenea realizarea nu numai a diodelor redresoare cum e detectorul cu siliciu, dar și a redresoarelor formate prin contactul între un metal și un semi-

conductor care permite redresarea unor curenți variabili corespunzînd unor puteri considerabile, iar aceasta este o aplicație remarcabilă a acestor dispozitive noi. Vom mai adăuga că studiul semiconductorilor a condus la o mai bună înțelegere și la perfecționarea pilelor fotoelectrice al căror prototip este pila fotoelectrică cu seleniu. În aceste „celule fotovoltaice" acțiunea luminii asupra unui semiconductor provoacă, printr-un fel de efect fotoelectric intern, deplasări de electroni care fac să apară o diferență de potențial între acest semiconductor și un metal cu care se află în contact: acest dispozitiv devine deci o pilă electrică sub acțiunea luminii, ceea ce exprimă și denumirea sa. Cunoașteți cu toții foarte numeroasele aplicații ale pilei fotoelectrice.

Nu voi insista mai mult asupra diverselor ramuri ale tehnicii semiconductorilor, lucru ce ar fi, desigur, inutil în fața unei reuniuni de specialiști care mă ascultă, și aș vrea să termin prezentînd trei observații scurte pe care mi le-a sugerat pregătirea acestei alocuțiuni.

Revenind la o idee enunțată deja la începutul expunerii mele, voi sublinia mai întîi contribuția esențială pe care au adus-o în tehnica dispozitivelor cu semiconductori, ca și în multe altele, cercetările și progresele științei fundamentale: rezultatele pe care ea i le-a furnizat i-au călăuzit mereu pe ingineri în realizările lor și le-au permis să facă ceea ce nu ar fi putut face fără ea. S-a dovedit aici, odată mai mult, într-un mod deosebit de pregnant, cît de fecundă e colaborarea între știință și industrie.

A doua observație care, fără să o contrazică pe cea dintîi, marchează unele limite ale ei, este următoarea. Nu este suficient să fi studiat științific o clasă de fenomene, să fi obținut despre ele explicații și imagini clare pentru a scoate de aici imediat aplicații industriale. Este necesară o muncă îndelungată și adesea foarte grea pentru a trece de la primul stadiu la al doilea. Astfel, pentru a obține tranzistori care să funcționeze satisfăcător, tre-

buie pornit de la un semiconductor riguros pur și trebuie introduse în el anumite impurități în cantități infinitezimale și dozate cu stricteţe. Acei care au pus la punct această fabricaţie au avut de învins mari obstacole și de suportat numeroase decepții. Se poate spune că pentru astfel de realizări distanța de la mînă la gură e mare și nu e suficient a concepe pentru a realiza, cel puțin dacă dorim să obținem aplicații tehnice rentabile sub raport comercial.

În sfîrșit, se poate menționa locul pe care l-au ocupat, în tehnica semiconductorilor, anumite elemente chimice rare în natură ca: germaniul, indiul, galiul etc. Aceste elemente rare reţineau puţin atenţia cu o jumătate de veac în urmă. Ele erau considerate adesea ca niște curiozități, obiecte de cercetare pentru chimiști meticuloși, iar fizicienii nu se interesau de ele decît pentru a completa conținutul căsuțelor din seria periodică a elementelor. Astăzi, ca o consecință a noilor nevoi ale industriei, aceste elemente rare au devenit obiectul unor noi metalurgii, lucrîndu-se adeseori cu cantități de materie foarte mici.

Doamnelor, domnilor, nu-mi mai rămîne, în încheiere, decît să urez deplină reușită colocviului dumneavoastră. Fie ca această reuniune, prin expunerile și schimburile de idei care vor avea loc în cadrul ei, să poată provoca numeroase și importante dezvoltări ale tinerei și viguroasei tehnici a dispozitivelor cu semiconductori.

MECANICA ONDULATORIE ŞI MICROSCOPIA ELECTRONICĂ

Anul 1905 a fost unul din cei mai importanți în istoria fizicii secolului al XX-lea, deoarece în acest an Albert Einstein, în vîrstă de numai 25 de ani, nu numai că a creat teoria relativității și a întreprins foarte importantele sale studii asupra mișcării browniene și a fluctuațiilor, dar a descoperit de asemenea dubla natură ondulatorie și corpusculară a luminii. În a sa „teorie a cuantelor de lumină" (astăzi am spune „teoria fotonilor"), el a afirmat cu îndrăzneală că undele luminoase conțin concentrări de energie a căror localizare este determinată de propagarea undei. Această ipoteză, confirmată de îndată de o interpretare foarte simplă a efectului fotoelectric rămas pînă atunci misterios, a pus în cazul luminii redutabila problemă a coexistenței undelor și corpusculilor, a cărei veritabilă soluție, cred la ora actuală, nu a fost încă dată de concepțiile general admise.

S-au scurs aproape douăzeci de ani de la geniala intuiție a lui Einstein cînd, în septembrie 1923, în note din *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, apoi în 1924 în teza mea de doctorat, am propus extinderea ideii coexistenței undelor și corpusculilor la cazurile tuturor particulelor materiale și îndeosebi la cazul electronilor. Această generalizare îndrăzneață m-a condus mai întîi la o întreagă serie de concluzii încurajatoare, iar importanța ei a fost semnalată de Einstein

însuși la începutul anului 1925. Ea a fost apoi confirmată de lucrările lui Schrödinger în 1926, apoi pusă în afară de orice dubiu prin descoperirea fenomenului de difracție a electronilor în 1927 (Davisson și Germer, G.P. Thomson, Ponte). Astăzi au putut fi reproduse cu electroni și cu alte particule toate fenomenele de difracție și de interferențe care sînt clasice în optica ondulatorie.

Lăsînd deoparte o expunere completă a consecințelor mecanicii ondulatorii, trebuie să insistăm aici asupra uneia dintre cele mai importante din ele care se referă la mișcarea electronilor și altor particule. Dacă propagarea undei asociate particulei poate fi descrisă cu ajutorul aproximării cunoscute sub numele de optică geometrică, putem asimila razele undei cu traiectoriile particulelor și regăsim astfel vechea mecanică „punctuală" a particulelor, astfel încît putem practic să renunțăm la intervenția undei. Aspectul ondulatoriu nu intervine decît atunci cînd optica geometrică nu mai e valabilă, adică atunci cînd propagarea undei face să apară fenomene de interferențe sau de difracție. În acest caz numai considerarea undei poate permite o previziune statistică a localizărilor particulei. Vom preciza aceasta insistînd în special asupra cazului electronului, deși concluzii analoge sînt aplicabile tuturor particulelor.

De multă vreme dinamica punctuală a electronului, cu modificările la care teoria relativității a supus-o, permite să se prevadă că traiectoriile electronilor emiși de o sursă constituită practic dintr-un punct pot, după ce au traversat cîmpuri electromagnetice potrivite, să se întretaie aproape exact, dînd o „imagine" a sursei. De aici decurge pentru electron o optică geometrică analogă cu aceea a luminii, în care cîmpurile electromagnetice joacă rolul de medii refringente. Nimic nu indică însă în acest caz că s-ar putea obține astfel imagini mai interesante decît cele furnizate de instrumentele de optică obișnuite a căror tehnică este azi foarte perfecționată. În domeniul validității dinamicii punctuale a electronului, putea deci să pară

puţin interesantă folosirea dispozitivelor electronice greoaie şi complicate pentru a obţine cu electroni ceea ce se poate obţine în condiţii mai bune cu lumina.

Apariţia mecanicii ondulatorii a schimbat complet această situaţie. Într-adevăr, în optica obişnuită, aplicarea regulilor opticii geometrice permite să se prevadă aproximativ natura imaginilor pe care lumina, după ce a traversat mediile refringente care constituie un instrument de optică, cum ar fi un microscop, este susceptibilă să le furnizeze. Dar dacă vrem să precizăm exact structura imaginilor şi să prevedem finețea detaliilor pe care ele le permit a fi sesizate (adică ceea ce numim puterea de separare a instrumentului), trebuie să ne adresăm opticii ondulatorii pentru a determina repartiția luminii, deci a fotonilor, pe imagine, fără a ne limita să ne servim de optica geometrică şi de noțiunea aproximativă de raze luminoase pe care o foloseşte. Se observă atunci că valoarea lungimii de undă e aceea care determină în mod esenţial puterea de separare şi că aceasta nu permite să se sesizeze separat pe imagine două puncte ale obiectului a căror distanţă este sensibil inferioară lungimii de undă. De aici rezultă că, folosind lumina vizibilă ale cărei lungimi de undă sînt de ordinul unei jumătăţi de miime de milimetru (sau $0{,}5 \times \times 10^{-4}$ cm), nu putem deloc sesiza detaliile structurii unui obiect la o scară inferioară unei zecimi de micron, sau 10^{-5} cm.

Aici însă mecanica ondulatorie va introduce pentru electron ceva cu totul diferit. Într-adevăr, unda care transportă electronul şi care determină prin intensitatea ei localizările posibile ale acestui corpuscul are o lungime de undă λ care este legată de cantitatea de mişcare p a electronului prin faimoasa relaţie fundamentală a mecanicii ondulatorii,

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

în care h este constanta lui Planck.

Or, formula precedentă permite să se vadă că e ușor de obținut, de exemplu cu un tun electronic, electroni de mare viteză a căror lungime de undă să nu mai fie egală decît cu o fracțiune de Angström (de ordinul a 10^{-9} cm). Se înțelege astfel că un microscop electronic, în care imaginile sînt obținute prin focalizarea electronilor de mare viteză sub acțiunea unor cîmpuri electrice sau magnetice adecvate, va putea permite observarea structurilor ale căror dimensiuni nu depășesc ordinul de mărime al Angström-ului, deci de aproape o mie de ori mai mici decît acelea pe care lumina ne permite să le explorăm. De aici rezultă că, în timp ce microscoapele optice ne permit cu greu să obținem măriri depășind 1 000, măririle care ating 30 000, 60 000 sau chiar mai mult sînt astăzi curente în optica electronică.

Vom remarca dealtfel că nimic nu ne împiedică să luăm în considerare, abstracție făcînd de dificultățile de realizare, construirea de microscoape analoge microscopului electronic, folosind însă alte particule încărcate decît electronii, de exemplu protoni. Întrucît formula $\lambda = \frac{h}{p}$ arată că, pentru o energie dată, lungimea de undă scade cînd masa particulei crește, ar trebui să putem obține cu un microscop protonic o putere de separare și mai ridicată decît cu un microscop electronic. Din păcate, dificultăți practice destul de mari se opun folosirii microscoapelor protonice: cîteva încercări au fost totuși făcute în acest sens și, la Paris, Claude Magnan și colaboratorii săi au putut realiza un prototip al unui astfel de microscop.

Punerea la punct din ce în ce mai perfecționată a microscoapelor electronice a deschis științei contemporane un cîmp imens de noi investigații, și anume în fizică, în biologie și în microbiologie. Oamenii de știință se află astfel, în domenii foarte diverse și de o importanță considerabilă, în posesia unui instrument de observație de o putere și de o finețe cu totul neegalate pînă acum.

Nu e cazul să expunem, în această scurtă privire de ansamblu, nici progresele și aplicațiile microscopiei electronice în ultimii douăzeci de ani, nici foarte numeroasele cunoștințe noi pe care ne-a permis să le dobîndim. Ni se pare însă important să insistăm asupra următoarei concluzii: făcînd să intervină în teoria electronului misterioasa coexistență a undelor și corpusculilor descoperită de Einstein în cazul luminii, mecanica ondulatorie e singura care a putut permite să se sesizeze paralelismul complet care există între optica luminoasă și optica electronică și să se transpună în această din urmă știință, sub o formă dealtfel uneori ceva mai complicată, toate calculele și toate previziunile care erau clasice în cea dintîi, în special în ceea ce privește aberațiile și puterile de separare. De aceea pare permis să se spună că ideea de bază a mecanicii ondulatorii conținea în ea, încă de la apariție, principiul microscopiei electronice și al tuturor imenselor sale posibilități de aplicație.

LASERII ŞI IMPORTANŢA LOR TEORETICĂ

Emisia spontană şi emisia provocată

În 1917, Albert Einstein, a cărui gîndire puternică şi-a pus amprenta pe numeroase ramuri ale fizicii contemporane, publica o mică notă de o imensă însemnătate. În ea el scotea la iveală o relaţie, cu totul neaşteptată la acea epocă, între legea frecvenţelor a lui Bohr şi legea radiaţiei corpului negru a lui Planck, şi aceasta introducînd deosebirea cu totul nouă între „emisiile spontane" şi „emisiile provocate" (sau stimulate).

Vom arăta mai întîi raţionamentul lui Einstein. Teoria atomului a lui Bohr (1913) ne învăţase că atomii se află întotdeauna în stări staţionare cu energii cuantificate şi că emisia sau absorbţia unei radiaţii de către un atom este însoţită de o tranziţie bruscă de la o stare cuantificată la o alta. Dacă E_2 şi $E_1 > E_2$ sînt energiile acestor două stări cuantificate, emisia unui foton de frecvenţa ν va corespunde trecerii de la starea E_1 la starea E_2, în timp ce absorbţia unui foton de această frecvenţă va corespunde trecerii inverse, de la starea E_2 la starea E_1 şi, întrucît ştim din celebra teorie a cuantelor de lumină a lui Einstein (1905) că energia unui foton purtat de o undă de frecvenţa ν este egală cu $h\nu$, conservarea energiei cere ca

$$(1) \qquad \nu = \frac{E_1 - E_2}{h} \quad (h \text{ constanta lui Planck}).$$

Aceasta este „legea frecvențelor“ a lui Bohr. În memoriul său din 1917, pornind de la aceste idei deja unanim admise și inspirîndu-se din anumite rezultate ale teoriei electromagnetice clasice, Einstein admite că un atom care se află în starea excitată E_1 poate trece în starea E_2 emițînd un foton $h\nu$ în două feluri diferite, fie spontan, fie sub acțiunea unei radiații ambiante de frecvența ν, în timp ce un atom care se află în starea E_2 nu poate evident să treacă în starea E_1 absorbind un foton $h\nu$ decît împrumutînd acest foton de la o radiație exterioară de frecvența ν. El examinează într-o incintă menținută la o temperatură T atomi din specia considerată în echilibru termic cu radiația corpului negru. După legea distribuției canonice a lui Boltzmann-Gibbs, numerele N_1 și N_2 ale atomilor aflați în stările cuantificate de energie E_1 și E_2 sînt într-un raport egal cu

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-\frac{E_1 - E_2}{kT}} \tag{2}$$

în care k este constanta lui Boltzmann. Introducînd ideea emisiilor spontane și a emisiilor provocate, pare natural să admitem că cei N_1 atomi de energie E_1 au, pe unitate de timp, o probabilitate $A + B_1\rho(\nu)$ de a emite un foton de frecvența ν, $\rho(\nu)$ fiind densitatea spectrală a radiației corpului negru pentru frecvența ν, în timp ce cei N_2 atomi în starea E_2 au, pe unitate de timp, o probabilitate egală cu $B_2\,\rho(\nu)$ de a trece în starea E_1 prin absorbția unui foton $h\nu$. Echilibrul termodinamic cere în acest caz să avem

$$N_1\,[A + B_1\,\rho(\nu)] = N_2 B_2\,\rho(\nu). \tag{3}$$

Or, pentru o frecvență infinit de mare, emisiile provocate trebuie să fie infinit preponderente și relația (3) trebuie să rămînă valabilă atunci cînd putem neglija pe A dinaintea lui $B_1\rho(\nu)$. Aceasta arată

că trebuie să admitem că $B_1 = B_2 = B$ și, ținînd seama de (1) și de (2), se obține cu ușurință

$$(4)\quad \rho(\nu) = \frac{A}{B\left(e^{\frac{E_1 - E_2}{kT}} - 1\right)} = \frac{A}{B\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1\right)}$$

Dar legea radiației corpului negru, descoperită în 1900 de către Planck, ne învață că avem:

$$(5)\qquad \rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Identificarea lui (4) și (5) arată că trebuie să admitem

$$(6)\qquad \frac{A}{B} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3}$$

ceea ce stabilește o legătură numerică precisă între coeficienții A și B ai emisiei spontane și ai emisiei provocate și arată relația profundă ce există între legea frecvențelor a lui Bohr (1) și formula radiației corpului negru a lui Planck (5).

Cu toată marea sa însemnătate teoretică, raționamentul lui Einstein nu punea în evidență un fapt care s-a dovedit mai tîrziu de o importanță capitală: acest fapt e că, în timp ce emisiile spontane au un caracter în întregime incoerent, fotonii a căror emisie este provocată în diverși atomi prin trecerea aceleiași unde sînt „coerenți", adică toți au aceeași fază ca și această undă. Structura total incoerentă a undelor care se încrucișează într-o radiație a corpului negru nu a permis lui Einstein să sesizeze clar această importantă deosebire de natură între emisiile spontane și emisiile provocate. Este deci interesant să reluăm raționamentul lui Einstein sub o formă puțin diferită, care să permită să exprimăm deosebirea de proprietăți ale celor două feluri de emisii și care să fie mai direct aplicabilă în cazul laserilor.

Să considerăm o cavitate cu un volum V traversată de o undă avînd o direcție și o frecvență ν bine determinate care poartă n fotoni. Dacă această cavitate conține atomi susceptibili să emită sau să absoarbă frecvența ν, astfel încît să avem $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$, se admite în teoria cîmpurilor cuantificate — ceea ce e în acord, cum se vede ușor, cu ipotezele lui Einstein precizate mai sus — că probabilitatea trecerii unui atom din starea E_2 în starea E_1 cu absorbția unui foton $h\nu$ este $P_{21} = Cn$, pe cînd probabilitatea trecerii unui atom din starea E_1 în starea E_2 cu emisia unui foton $h\nu$ este

$$P_{12} = C(n + 1).$$

De aici rezultă că un atom în starea E_1 poate emite un foton pe o undă care are aceeași direcție de propagare și chiar aceeași frecvență ca și unda care traversează cavitatea cu o probabilitate egală cu $P'_{12} = C(n + 1)$. Acest atom însă poate emite de asemenea cu o probabilitate P''_{12} un foton $h\nu$ pe oricare din celelalte unde de frecvența ν, pînă atunci vide de fotoni, adică pentru care $n = 0$, ce se pot stabili în cavitate. Numărul acestor unde susceptibile să existe în cavitate este, după o formulă bine cunoscută a lui Jeans, egal cu $\frac{8\pi\nu^2 V}{c^3}$, ceea ce ne dă $P''_{12} = C\left(\frac{8\pi\nu^2 V}{c^3} - 1\right)$, prezența factorului -1 în paranteză justificîndu-se prin faptul că în expresia pentru P'_{12} am ținut deja cont de unda care poartă n fotoni. În cele din urmă, probabilitatea tranziției $1 \to 2$ pe unitatea de timp este deci

$$P_{12} = P'_{12} + P''_{12} = Cn + C\frac{8\pi\nu^2}{c^3}V. \tag{7}$$

Or, aici trebuie să luăm pentru exprimarea lui $\rho(\nu)$

$$\rho(\nu) = \frac{nh\nu}{V} \tag{8}$$

ceea ce ne dă

$$P_{12} = C\frac{8\pi\nu^2 V}{c^3} + C\frac{V}{h\nu}\rho(\nu). \tag{9}$$

Dacă vrem să scriem această expresie a lui P_{12} sub forma $A + B\rho(\nu)$, găsim imediat pentru raportul $\frac{A}{B}$ formula (6) a lui Einstein: această formulă este astfel regăsită fără intervenția legii radiației corpului negru, nici a noțiunii de temperatură, nici a legii de distribuție canonică a lui Boltzmann-Gibbs, ceea ce pare interesant.

În plus, formula (7) are avantajul de a separa net termenul Cn care corespunde emisiei unui foton coerent pe unda de frecvență ν și termenul $C\frac{8\pi\nu^2}{c^3}V$ care corespunde emisiei de fotoni incoerenți, pe oricare din undele ce se pot stabili în cavitate. Astfel rezultă, ceea ce mi se pare important, că, scriind formula $P_{12} = C(n+1)$, se blochează, simultan, într-o manieră ce se pretează la confuzie, o emisie provocată coerentă și o emisie spontană incoerentă. Acest mod de a proceda, practicat în forma actuală a teoriei cîmpurilor electromagnetice cuantificate, fără a ține cont de deosebirea esențială de natură a celor două feluri de emisii, este poate una din cauzele dificultăților întîlnite în această teorie.

Undele hertziene și undele luminoase

Incoerența emisiilor spontane și coerența emisiilor induse a căror importanță a apărut cu claritate în ultimii ani după descoperirile succesive ale maserilor și laserilor, readuc în atenție deosebirea, de mult observată de cei care au reflectat asupra ei, care opune undele hertziene și undele luminoase emise de sursele obișnuite de lumină, cu toate că și

unele și celelalte sînt unde de aceeași natură electromagnetică. Un emițător de unde hertziene întreținute emite continuu o undă electromagnetică transportînd un foarte mare număr de fotoni coerenți, cu un redus conținut energetic $h\nu$. Într-adevăr, pe de o parte, caracterul continuu și coerent al undei este demonstrat de reușita, pînă și în domeniul undelor milimetrice, a folosirii exclusive a ecuațiilor lui Maxwell pentru a prevedea proprietățile acestei unde; pe de altă parte, prezența fotonilor în undă este demonstrată prin intervenția certă a acestor fotoni în funcționarea maserilor. Din contră, în emisia de unde luminoase de către o sursă obișnuită de lumină, atomii sursei emit individual grupuri de unde de o lungime destul de mică (de ordinul unui metru) purtînd fiecare cîte un singur foton. Fără îndoială, majoritatea surselor de lumină folosite în mod obișnuit sînt destul de intense pentru ca grupurile de unde pe care le emit acești atomi să se suprapună și ca fotonii să se afle astfel în coerență cu unda ce rezultă din această superpoziție: această coerență însă, care e denumită „coerență parțială", are un caracter foarte efemer deoarece compoziția undei rezultante variază mereu din cauza duratei foarte scurte a emisiilor individuale. Coerența parțială a undelor luminoase emise de sursele de lumină obișnuite a fost studiată de diferiți autori și rezultatele pe care le-au obținut au adus mari servicii pentru interpretarea a numeroase fenomene, și anume în ceea ce privește formarea imaginilor furnizate de instrumentele optice: totuși ea nu are același caracter ca și coerența totală de o durată foarte lungă a fotonilor emiși de un emițător de unde hertziene întreținute. Invenția laserilor a fost aceea care a permis pentru prima oară obținerea unor unde luminoase avînd aceeași structură și aceleași proprietăți de coerență ca și undele hertziene și aceasta e ceea ce, din punct de vedere pur teoretic, conferă o mare importanță acestei invenții.

O privire foarte sumară asupra laserilor și a aplicațiilor lor

Utilizarea fenomenului de emisie stimulată, sugerată încă în 1952 de Weber și de Basov și Prohorov, a fost realizată în 1954 pentru undele hertziene de către un grup de fizicieni americani condus de Townes. Izolînd, cu ajutorul unei trieri efectuate de un cîmp magnetic neomogen, atomi aflați în aceeași stare cuantică excitată și trimițîndu-i într-o cavitate rezonantă unde una dintre frecvențele proprii coincide cu una dintre frecvențele pe care le pot emite atomii excitați a fost posibilă obținerea, desigur, printr-o alegere judicioasă a atomilor utilizați în funcție de natura spectrului stărilor lor staționare, a unei remarcabile stabilizări a undei al cărei sediu este cavitatea rezonantă: de aici a rezultat posibilitatea de a construi „orologii atomice" care permit un control extrem de precis al frecvențelor și aceste dispozitive au făcut de atunci obiectul unui mare număr de aplicații științifice și tehnice de mare importanță.

Intensitatea fenomenului de emisie provocată este însă, în aceste condiții, destul de slabă, deoarece în mod normal numărul atomilor ce se află într-o stare excitată este mult mai mic decît cel al atomilor în starea fundamentală de mai mică energie cuantificată. Pentru a obține o emisie provocată puternică trebuie realizată, în ansamblul atomilor utilizați, o foarte mare proporție de atomi „excitați" sau, cum se spune, trebuie provocată o „inversare de populație" între o stare excitată și stările mai puțin excitate. Acest lucru a putut fi realizat datorită unui foarte ingenios procedeu de „pompare optică", pe care Alfred Kastler și colaboratorii săi l-au pus la punct în 1949. Acest procedeu constă esențialmente în a provoca o inversare de populație în atomii utilizați iradiindu-i cu ajutorul unui puternic fascicul de lumină a cărui frecvență corespunde cu inversarea de populație pe care vrem să o producem. Dacă există niveluri intermediare între nivelul fundamental al

atomilor și nivelul excitat care a fost „suprapopulat“, atomii aflați sub acțiunea unei radiații hertziene a cărei frecvență corespunde trecerii de la starea suprapopulată la o stare mai puțin excitată vor emite un mare număr de fotoni coerenți care vor îmbogăți stocul de fotoni purtați de unda hertziană incidentă. Din acel moment a devenit ușor să se construiască maseri amplificatori de unde hertziene avînd proprietăți foarte interesante, ale căror aplicații sînt numeroase. Și, firește, așa cum se întîmplă întotdeauna în radioelectricitate, atunci cînd a fost inventat un dispozitiv amplificator, maserul amplificator poate fi transformat, mărind suficient amplificarea, într-un maser oscilator, sursă de unde hertziene întreținute, și acest lucru e de asemenea foarte interesant din punct de vedere tehnic.

Și acum, de la maseri vom trece la laseri. Diverși fizicieni au examinat de cîțiva ani posibilitatea de a extinde la cazul luminii procesul de emisie provocată folosit pentru undele hertziene în maseri. Această extindere părea totuși îngreuiată de faptul, foarte vizibil în formula (6), că raportul între emisia spontană și emisia provocată crește foarte repede cu frecvența : or, emisia spontană, fiind incoerentă, joacă, în raport cu emisia provocată, rolul unui „zgomot“ parazit în sensul atribuit cuvîntului „zgomot“ în tehnica radioelectrică. Pentru a depăși această dificultate trebuie ales cu pricepere corpul în care trebuie să se producă emisia provocată după distanțarea nivelurilor sale de energie și apoi trebuie realizată o pompare foarte puternică, cu o frecvență superioară aceleia pe care vrem s-o facem să fie emisă. Aceasta e ceea ce a realizat fizicianul american Maiman în 1960. Din lucrarea sa, și din cele, foarte numeroase, care au urmat imediat după ea, a rezultat mai întîi punerea la punct a laserului solid, al cărui tip curent este laserul cu rubin, apoi invenția altor forme de laseri despre care vom vorbi mai departe.

Într-un laser cu rubin o baghetă de rubin este așezată pe axul unei cavități cilindrice de tipul

Pérot-Fabry terminată cu două oglinzi convergente ce concentrează radiația pe baghetă și din care una cel puțin este ușor transparentă. Unde luminoase staționare pot să se instaleze în această cavitate și să scape puțin în afară prin oglinda semi-transparentă. Rubinul este supus la un brusc „flash" de lumină foarte intensă, de o frecvență ridicată, ceea ce produce în rubin o pompare optică foarte energică. Din această pompare rezultă, prin proces provocat, emisia sacadată, prin oglinda semi-transparentă, a unor grupuri de unde luminoase avînd cîteva zeci de metri lungime și purtînd un foarte mare număr de fotoni coerenți: aceste grupuri de unde sînt deja mult mai lungi decît grupurile de unde purtînd un singur foton emis individual de către atomii unei surse de lumină obișnuită, grupuri de unde a căror lungime este de ordinul metrului. Avem, așadar, aici analogul în frecvență luminoasă al impulsurilor folosite în tehnica radiofrecvențelor (de exemplu, în dispozitivele radar). Energia fiecărui impuls emis de un laser cu rubin este foarte mare, de ordinul a cincisprezece megawați timp de cincizeci de nanosecunde; întrucît aici radiația capătă forma unui cilindru cu o secțiune foarte mică și cu o direcție foarte bine definită, din cauza numărului considerabil de fotoni pe care îi transportă, această radiație corespunde unui flux de energie pe centimetru pătrat extraordinar de mare. Aceasta permite realizarea experienței atît de uimitoare care constă în perforarea unei lame de oțel cu ajutorul unui fascicul îngust de lumină emis de un laser cu rubin. Vom adăuga, fără a insista asupra acestui lucru, că se pot de asemenea realiza laseri cu solid folosind alte corpuri decît rubine.

Există însă și o altă formă foarte importantă de laseri: laseri cu gaz, al căror principiu a fost arătat de Javan în 1959. Laserii cu solid furnizează grupuri de unde luminoase care corespund unei densități energetice extrem de ridicate, dar care, din cauza caracterului lor de impulsuri izolate, nu po-

sedă decît coerenţe de scurtă durată. Aceasta se explică prin structura foarte neomogenă a solidelor folosite şi părea probabil că, înlocuind solidul cu un mediu gazos, am fi putut obţine grupuri foarte lungi de unde coerente, avînd ca analogi în tehnica radioelectrică nu impulsuri de tipul radar, ci emisii de unde întreţinute de lungă durată. Pentru a obţine emisia provocată dorită, se foloseşte un procedeu ingenios care face apel la o descărcare electrică într-un amestec de două gaze. Deşi s-ar putea folosi mai multe amestecuri de două gaze, funcţionarea laserului cu gaz poate fi comod explicată prin exemplul amestecului foarte frecvent folosit de neon şi heliu. Se întîmplă ca atomul de heliu să posede un nivel excitat a cărui energie este foarte puţin superioară aceleia a unui nivel excitat al neonului. O descărcare electrică ce traversează amestecul foarte rarefiat în proporţii convenabile de neon şi de heliu face să treacă atomii celui de-al doilea din aceste gaze în nivelul excitat în chestiune şi ciocnirea atomilor de heliu cu un atom de neon operează un transfer neradiativ de energie care aduce atomii de neon în starea excitată de energie vecină şi îi pune astfel în stare de a emite lumina prin procesul tranziţiei provocate. Avem aici un fel de „pompare indirectă" în care intervin atomii a două gaze diferite şi acest proces are drept rezultat emisia continuă a unei lumini de putere slabă (de ordinul unui miliwatt), dar de o foarte lungă durată de coerenţă. Deşi laserii cu gaz, datorită slabei intensităţi a undei pe care o emit, nu se pot preta la toate aplicaţiile tehnice ce pot fi imaginate pentru laserii cu solid, interesul lor din punctul de vedere al cercetărilor fundamentale este considerabil. Ei sînt în special cei care, precum am mai spus-o, permit obţinerea unor unde luminoase a căror structură este cu totul analogă aceleia a undelor hertziene întreţinute folosite în telecomunicaţiile radioelectrice. Unda emisă de un laser cu gaz care transportă în ansamblul său un număr foarte mare de fotoni poate, într-adevăr, să atingă o lungime de zeci şi chiar de sute de kilometri.

Pentru completare, trebuie adăugat că s-au putut pune la punct destul de recent laseri care folosesc semiconductori. Acești laseri, al căror studiu e în plină dezvoltare, furnizează unde luminoase de o coerență mediocră, dar cu un mare randament, ceea ce poate fi interesant pentru anumite aplicații.

Numeroase utilizări ale laserilor au fost proiectate în domenii foarte diverse, cum sînt: telecomunicațiile, radarul, transportul de energie, metalurgia, chiar chirurgia etc. Punerea la punct a acestor aplicații progresează destul de încet, deoarece se lovește de numeroase dificultăți, dar putem considera că, într-un viitor mai mult sau mai puțin apropiat, ele vor lua o mare extindere. Nu putem insista aici asupra acestui subiect.

Revenire la importanța teoretică a funcționării laserilor

Am vrea, în încheiere, să insistăm din nou asupra importanței teoretice a fenomenului de emisie provocată pe care a evidențiat-o inventarea maserilor și mai mult încă aceea a laserilor. De la Maxwell și Hertz se știa că nu există vreo deosebire esențială de natură între lumină și undele electromagnetice ale căror lungimi de unde se întind astăzi de la cîțiva kilometri pînă la o fracțiune de milimetru. Subzista totuși o deosebire esențială de structură între undele hertziene întreținute, furnizate de emițători radioelectrici, unde care sînt de mare lungime și de mare coerență, și grupurile de unde relativ scurte, incoerente între ele și purtînd fiecare un singur foton pe care îl emit individual atomii unei surse luminoase obișnuite. Or, această deosebire este ștearsă astăzi, cînd cu laseri se obțin unde luminoase de mare lungime și de mare coerență, ceea ce este deja un rezultat foarte important.

Mai mult. Modul însuși în care procesul de emisie provocată asigură funcționarea laserului este

plin de învățăminte. El arată, într-adevăr, că atomi localizați în diferite puncte ale cavității laserului, cavitate ale cărei dimensiuni sînt macroscopice, emit fotoni care sînt toți în fază cu o aceeași undă, astfel încît trebuie admis că această undă ritmează emisiile tuturor acestor atomi. Aceasta ni se pare a conduce în mod necesar la ideea că unda electromagnetică, care acoperă toți atomii și ritmează emisia lor, este în mod necesar o realitate fizică, un proces concret care se desfășoară în toate punctele cavității laserului și care nu se reduce la un simplu formalism sau la o simplă reprezentare de probabilitate, deoarece este imposibil să admitem că o formulă matematică sau o reprezentare de probabilitate poate să impună un ritm unui fenomen fizic cum e o emisie de radiație. Fizicienilor din vechile generații le-ar fi părut destul de stranie necesitatea de a se insista asupra acestor puncte, însă nouă aceasta nu ni se pare inutil în stadiul actual al fizicii teoretice. Credem că este necesar să se redea undei electromagnetice și, în mod mai general, undelor asociate tuturor particulelor, prin intermediul concepțiilor de bază ale mecanicii ondulatorii, dintre care unda electromagnetică nu e decît un caz particular, un caracter mult mai concret decît par să o admită astăzi majoritatea teoreticienilor fizicii cuantice. Cum însă este imposibil de a separa corpusculul de unda sa, adică aici fotonul de unda electromagnetică, credem că va trebui să ajungem să ne facem o reprezentare precisă a coexistenței și a legăturii undelor și corpusculilor, problemă capitală pusă de la apariția mecanicii ondulatorii în 1923 și chiar, în ceea ce privește lumina, de la teoria cuantelor de lumină (1905). Această problemă nu ni se pare să fi primit la ora actuală o soluție satisfăcătoare. Dar, fără a insista asupra acestor idei ale mele personale, cred să putem afirma că toți fizicienii vor fi de acord să recunoască că realizarea laserilor a constituit o etapă esențială în progresul cunoștințelor noastre asupra naturii luminii.

COEXISTENȚA FOTONILOR ȘI UNDELOR ÎN RADIAȚIILE ELECTROMAGNETICE ȘI TEORIA DUBLEI SOLUȚII

Descoperirea coexistenței undelor și corpusculilor

În 1905, anul în care punea bazele teoriei relativității, un tînăr de 25 de ani, Albert Einstein, săvîrșea o adevărată revoluție în teoria luminii. Deși, de la lucrările lui Augustin Fresnel, părea cert că lumina este constituită din unde a căror natură electromagnetică a descoperit-o mai tîrziu James Clerk Maxwell, Einstein admise că lumina conține și sub formă corpusculară mici regiuni de concentrare puternică de energie pe care le-a denumit „cuante de lumină" și pe care noi le numim astăzi „fotoni". Sprijinindu-se pe această ipoteză îndrăzneață, inspirată de teoria cuantelor a lui Planck, pe atunci veche de numai cinci ani, el a putut explica, printr-un raționament exprimat în cîteva rînduri, caracteristicile rămase misterioase ale efectului fotoelectric, admițînd că lumina de frecvența ν transportă cuante de lumină de o energie $h\nu$, h fiind faimoasa constantă a lui Planck.

În ciuda marelui succes pe care îl repurta astfel de la apariția sa, concepția lui Einstein ridica mari dificultăți deoarece părea destul de greu de a o concilia cu existența, atît de bine dovedită, a fenomenelor de interferență și de difracție. Avînd în vedere cele ce urmează, este interesant de reamintit că, în acea epocă, Einstein a avut următoarea idee: undele luminoase ar fi unde foarte slabe și nedecelabile din punct de vedere energetic,

unde pe care, din acest motiv, le-a calificat ca unde „fantome": rolul lor ar fi de a transporta fotonii şi de a ghida mişcarea lor, reglînd repartiţia lor în spaţiu conform cu ceea ce arată fenomenele de interferenţă şi de difracţie.

S-au scurs aproape douăzeci de ani cînd, în 1923—1924, în note la *Comptes Rendus*, apoi în teza mea de doctorat, am emis ideea că coexistenţa undelor şi corpusculilor descoperită de Einstein în cazul luminii trebuie să se extindă la toţi corpusculii materiei şi că existenţa unor stări cuantificate în atomi, fapt recunoscut de la apariţia teoriei atomului de Niels Bohr (1913), trebuia explicată presupunîndu-se că mişcarea electronilor este asociată cu propagarea unei unde. Precizată prin lucrările lui Schrödinger (1926), care a formulat explicit ecuaţia propagării undei asociate electronului şi a dedus de aici consecinţe importante, confirmate experimental de descoperirea difracţiei electronilor pe cristale (Davisson şi Germer, G.P. Thomson, Ponte, 1927), concepţia mea despre coexistenţa generală a undelor şi corpusculilor m-a condus în 1926—1927 la o teorie pe care am denumit-o „teoria dublei soluţii" şi am expus-o într-un articol din *Journal de Physique* din mai 1927. Generalizînd în fond concepţia undei fantomă sugerată de Einstein în cazul luminii, presupuneam că corpusculul este o foarte mică regiune de mare concentrare de energie, un fel de singularitate, în sînul unei unde întinse care îl ghida în mişcarea sa, astfel încît probabilitatea prezenţei corpusculului într-un punct la un moment dat să poată explica fenomene de interferenţă şi de difracţie, şi aceasta atît în cazul corpusculilor materiali ca electronul, cît şi în cazul fotonilor. Dealtfel, raportul de filiaţie care, în concepţia mea, făcuse ca mecanica ondulatorie să decurgă din teoria cuantelor de lumină a lui Einstein nu mi-a permis niciodată să mă îndoiesc că, cel puţin în ce priveşte esenţialul (adică abstracţie făcînd de chestiunile

de masă, de spin, de forma ecuațiilor de unde etc.), coexistența undelor și corpusculilor ar fi de aceeași natură în cazul fotonilor ca și în cel al tuturor celorlalte particule.

Nu voi reaminti aici, întrucît am făcut-o de mai multe ori în acești ultimi ani, cum a fost respinsă concepția abia schițată pe care am propus-o, în urma discuțiilor în Consiliul de fizică Solvay din octombrie 1927, în favoarea interpretării probabiliste introduse mai întîi de Max Born și dezvoltate apoi sub forma unei teorii a „complementarității" de către Niels Bohr și discipolii săi, și îndeosebi de Werner Heisenberg, al cărui nume a rămas legat de faimoasele relații de incertitudine. Am explicat de ce, nereușind să dezvolt concepția mea într-un mod realmente satisfăcător, m-am raliat la interpretarea probabilistă, singura susceptibilă în acel moment de a fi dezvoltată într-o formă destul de riguroasă pentru a face obiectul cursurilor cu predarea cărora am fost însărcinat din acel moment.

Am arătat de asemenea de ce în jurul anilor 1951—1952 am revenit la ideile mele inițiale, reflecțiile mele determinîndu-mă să consider că numai ele puteau oferi o reprezentare exactă a realității fizice. Desigur, eu nu neg valoarea previziunilor făcute cu ajutorul formalismelor denumite „mecanica cuantică" sau „teoria cuantică a cîmpurilor"; cred însă, așa cum o spunea totdeauna Einstein, că ele nu dau decît o viziune statistică a fenomenelor fără a descrie exact realitatea fizică subiacentă.

Ideile mele privind interpretarea coexistenței undelor și corpusculilor de către teoria dublei soluții au progresat mult în ultimii ani, dar, dată fiind întinderea subiectului, nu pot decît să-l trimit pe cititor la lucrările indicate în bibliografia de la sfîrșitul articolului, iar aici trebuie să mă limitez la un rezumat foarte sumar al teoriei dublei soluții, rezumat care e un preambul necesar la subiectul pe care vreau să-l tratez.

Expunere sumară a teoriei dublei soluții

Ideea esențială a teoriei dublei soluții, aceea care îi justifică numele, este că trebuie să distingem două soluții ale ecuațiilor de unde folosite în mecanica ondulatorie: una este unda Ψ bine cunoscută care, conform interpretării lui Max Born, nu e decît o reprezentare de probabilitate; cealaltă, unda u, care este adevărata descriere a realității fizice. În timp ce unda Ψ este fictivă și structura sa omogenă nu comportă nimic ce ar putea permite să localizăm în ea un corpuscul, unda u trebuie să comporte o foarte mică regiune singulară unde cîmpul ondulatoriu capătă o foarte mare valoare și tocmai această regiune este corpusculul.

Structura undei u poate fi deci precizată spunînd că, în afara foarte micii regiuni care constituie corpusculul, ea se reduce la o undă uniformă de foarte mică amplitudine pe care o voi numi „unda de bază" și o voi desemna prin litera v; ea este asimilabilă undei fantomă a lui Einstein. Pe această undă de bază este într-un fel „grefat" corpusculul și această grefare e aceea care obligă corpusculul să se deplaseze într-o manieră care e legată de propagarea undei de bază. Această mișcare s-ar efectua conform unei legi, „formula ghidării", care ia diverse forme conform ecuației de unde a corpusculului și al cărei sens profund este următorul: corpusculul se deplasează în undă în așa fel încît vibrația sa internă rămîne totdeauna în fază cu unda care îl poartă[1]. Acest rezultat apare dealtfel ca aproape evident dacă se observă că, în această teorie, corpusculul nu este altceva decît o mică regiune a undei în care cîmpul ondulatoriu este exacerbat. Considerații asupra cărora nu

---

[1] Faza φ a undei v este definită prin relația $v = ae^{it}\varphi$, în care a și φ sînt funcții reale de $xyzt$. Faza vibrației interne a corpusculului care se află în punctul xyz la timpul t este egală cu $\varphi(xyzt)$. Faza este astfel definită la modul general care nu implică deloc ca unda v să fie asimilabilă cu o undă plană monocromatică.

mă pot extinde aici m-au determinat să cred că adevăratele ecuaţii ale undei u sînt neliniare, dar că, în afara foarte micii regiuni de mare amplitudine constituită de corpuscul (şi poate pe marginile grupurilor de unde, dacă ele sînt abrupte), termenii neliniari devin neglijabili în aşa fel încît, în aproape întreaga sa întindere, unda u se confundă cu unda de bază v care ascultă de ecuaţiile liniare obişnuite ale mecanicii ondulatorii. Deşi din punct de vedere statistic, despre care vom vorbi acum, totul ar fi reglat de proprietăţile undei de bază, intervenţia neliniarităţii poate deveni importantă în anumite cazuri, precum vom vedea mai jos.

Ghidarea corpusculilor de către unda de bază ne face să credem că probabilitatea prezenţei corpusculului într-un punct al spaţiului la un moment dat este furnizată de o expresie care, în cazul simplu al ecuaţiei lui Schrödinger, este proporţională cu pătratul modulului amplitudinii undei de bază. Totuşi, şi acesta este unul din progresele importante ale teoriei mele în ultimii ani, această concluzie nu poate deveni mai riguroasă decît admiţînd existenţa, în ceea ce numim vid, a unui mediu ascuns, mediul subcuantic al lui Bohm şi Vigier, care s-ar afla în interacţiune constantă cu corpusculul şi care i-ar provoca perturbări continue fără ca acordul său de fază cu unda de bază să fie în cele din urmă deranjat. De trei ani încoace am construit, dezvoltînd această idee, o foarte curioasă „termodinamică ascunsă a particulelor" asupra căreia nu pot insista aici[1], dar care mi se pare a contribui într-o manieră importantă la progresele viitoare ale fizicii cuantice.

Înainte de a termina această analiză foarte sumară a teoriei dublei soluţii, aş vrea să mai fac unele remarci importante. Pentru a pune teoria mea în acord cu formalismul probabilist uzual care foloseşte numai unda Ψ, trebuie stabilită între această undă Ψ şi unda de bază fizicește reală,

[1] A se vedea bibliografia de la finele articolului şi paginile următoare ale acestui volum.

pe care o notez cu litera v, relaţia $\Psi = Cv$ în care C este un factor de normare care ne permite să considerăm $|\Psi|^2$ ca expresia care dă *în valoare absolută* probabilitatea prezenţei corpusculului într-un punct. Unda astfel definită este deci o undă fictivă obţinută pornind de la unda de bază reală şi cu amplitudine determinată de o normare arbitrară. De aici rezultă că dacă undele v şi Ψ sînt într-adevăr amîndouă soluţii ale aceloraşi ecuaţii liniare de propagare, unda de bază posedă proprietatea de compunere ce caracterizează undele liniare fiziceşte reale, în timp ce unda Ψ nu posedă această proprietate din cauza operaţiei arbitrare de normare; această ultimă împrejurare, semnalată de multă vreme de Dirac, poate fi foarte uşor verificată. După părerea mea, acest fapt explică veritabila semnificaţie a ceea ce se numeşte după Heisenberg „reducerea pachetului de probabilităţi": în afară de aceasta, el ne permite să înţelegem de ce unda Ψ, deşi nu este decît o reprezentare subiectivă de probabilitate, *pare* să determine fenomene fizice observabile cum sînt: difracţia, interferenţele, nivelurile de energie ale stărilor staţionare ale atomilor etc. După părerea mea, nu se poate admite ca o reprezentare de probabilitate să determine un fenomen fizic observabil, dar acest paradox este evitat dacă se presupune, conform teoriei dublei soluţii, că în spatele undei fictive Ψ este disimulată o undă de bază v, care este un proces fizic real susceptibil de a determina fenomene observabile[1].

---

[1] Pentru a arăta că o distribuţie de probabilităţi nu poate determina un fenomen fizic observabil, se poate face următoarea remarcă oarecum banală. Un tabel de mortalitate poate da o reprezentare a probabilităţilor de decese, de exemplu la Paris în 1965, dar nu acest tabel e cauza deceselor. Cînd cineva moare, moare de o boală, în urma unui accident sau din altă cauză, dar nu tabelul de mortalitate e cel care provoacă decesul.

Şi totuşi, ceva analog se admite implicit în interpretarea uzuală a mecanicii cuantice. Unda Ψ, care e fictivă, fiindcă e normată arbitrar, nu poate fi cauza fenomenelor observabile pe care pare a le determina. Adevărata cauză

Voi mai adăuga o ultimă remarcă. Ecuațiile de undă ale mecanicii ondulatorii conțin termeni imaginari și soluțiile lor sînt funcții complexe. Unda v de bază va fi deci reprezentată printr-o funcție complexă. La prima vedere poate părea imposibil ca un proces fizic real să fie reprezentat printr-o astfel de funcție, dar vedem că aceasta nu se întîmplă deoarece o funcție complexă F se descompune în două funcții reale F_1 și F_2 prin formula $F = F_1 + iF_2$ și, introducînd această descompunere în ecuațiile de unde și separînd realul de imaginar, se obține un ansamblu de ecuații, toate reale, care leagă, într-o anumită manieră, evoluția funcțiilor reale F_1 și F_2. Vom vedea utilitatea acestei remarci cînd vom aplica, cum o vom face acum, teoria dublei soluții la cazul cîmpurilor electromagnetice și al fotonilor.

Unda de bază a fotonilor ar fi o undă electromagnetică de tip clasic, dar de foarte mică amplitudine

În teoria dublei soluții pare a priori cert că unda de bază a fotonilor trebuie asimilată cu o undă electromagnetică de foarte mică amplitudine, ascultînd, cel puțin foarte îndeaproape[1], de ecuațiile lui Maxwell. Reflecțiile mele recente asupra procedeului de „apodizare" a imaginilor, folosit în tehnica instrumentelor optice, mi s-au părut a con-

---

trebuie să fie în mod necesar o undă fizică reală, cu o amplitudine bine determinată, care este independentă de funcția Ψ, dar de care aceasta trebuie să fie strîns legată. Acesta e motivul profund pentru care am crezut, cu aproape patruzeci de ani în urmă, că era cazul de a distinge o undă reală, unda de bază v, și o undă fictivă, unda Ψ, soluție a aceleiași ecuații de undă. Acesta e punctul de plecare al teoriei dublei soluții.

[1] Spun foarte îndeaproape deoarece am fost totdeauna de părere că trebuia introdus în ecuațiile lui Maxwell un foarte mic termen de masă, dar această masă trebuie să fie atît de mică încît să nu modifice sensibil soluțiile ecuațiilor lui Maxwell.

firma această concepţie şi voi expune raţionamentul pe care l-am făcut în această privinţă.

Fizicienii care caută să obţină imagini bune cu ajutorul instrumentelor optice sînt stingheriţi de efectele de difracţie ce intervin în aceste instrumente, aceste efecte avînd drept consecinţă dispersarea luminii în jurul imaginii prevăzute de optica geometrică. Din acest motiv, ei au căutat să elimine printr-un dispozitiv adecvat acest gen de „picior" care prezintă repartiţia intensităţilor în jurul imaginii, astfel încît să obţină printr-un procedeu de „apodizare" o repartiţie mai concentrată a intensităţilor şi, în consecinţă, o imagine mai clară.

Fără a intra în detaliile teoriei, vrem să reamintim principiul metodei de apodizare. Să considerăm un instrument optic comportînd un orificiu, de exemplu de formă circulară. Fără apodizare, lumina incidentă va avea o intensitate în general constantă pe întregul orificiu şi principiul lui Huyghens, alăturat formulei de inversiune a lui Fourier, ne permite să calculăm forma imaginii cu piciorul său jenant. Să aşezăm însă pe orificiu o lamă absorbantă de grosime variabilă, de exemplu mai groasă la margini decît la mijloc. În acest caz, pe orificiu intensitatea nu va mai fi uniformă, ea va fi mai mare în centrul orificiului decît pe marginile lui. Teoria arată şi experienţa confirmă că figura de difracţie în planul imagine se poate îngusta şi că astfel se poate obţine o imagine apodizată mai clară.

Or, pare sigur (experienţa s-ar putea face, fără îndoială, uşor) că imaginea apodizată s-ar obţine fără vreo modificare dacă, în loc de a folosi o sursă de lumină intensă, s-ar folosi, ca în celebrele experienţe ale lui Taylor, o sursă foarte slabă, atît de slabă încît fotonii cu grupurile lor individuale de unde nu ar cădea decît unul cîte unul pe orificiul aparatului. Să ne gîndim la ce s-ar petrece în acest caz. Toţi fotonii care ar trece prin orificiu şi care ar contribui la formarea imaginii ar traversa lama absorbantă şi totuşi aceşti fotoni, care nu ar fi suferit o absorbţie cuantică discontinuă în lamă, nu s-ar mai repartiza în acelaşi mod în planul ima-

gine ca în absența lamei. Aceasta mi se pare a ne impune să admitem că „ceva“ care însoțește fotonul și influențează mișcarea lui a fost absorbit în lamă *printr-un proces necuantic diferit de absorbția prin foton*. Or, acest „ceva“ nu mi se pare a putea fi decît grupul de unde de bază care poartă și ghidează fotonul. Acest grup de unde pare să poată fi asimilat cu un grup de unde electromagnetice care s-ar propaga și ar fi absorbit în lamă într-o manieră cvasiclasică. Regăsim astfel ideea că fotonul este purtat de o undă electromagnetică de bază de tip clasic, dar de o foarte slabă intensitate, unda fantomă a lui Einstein.

Raționamente analoge se pot aplica și altor fenomene optice. Toate sugerează că la nivelul de intensitate foarte slabă a undei de bază se desfășoară procese foarte bine descrise de teoria electromagnetică clasică. Pentru a preciza această viziune, am fost determinat să admit (aici nu pot menționa acest punct decît foarte succint) că, $F = F_1 + iF_2$ fiind una din mărimile electromagnetice ale undei de bază, partea sa reală F_1 este mărimea clasică corespunzătoare în ecuațiile lui Maxwell. În ceea ce privește partea imaginară F_2, ea pare să fie corelată cu mărimea, atît de importantă în electrotehnică, care se numește puterea reactivă.

Dezvoltînd teoria undelor electromagnetice de bază, va trebui să nu se piardă niciodată din vedere anumite idei esențiale de care teoriile actualmente la modă nu mi se par a ține suficient seama. Pe de o parte, unda plană monocromatică nedefinită și eternă nu este decît o abstracție care nu e niciodată realizată. Pe de altă parte, undele staționare care permit a defini moduri de vibrație sînt cazuri particulare ce se prezintă numai cînd unda este închisă într-o regiune finită a spațiului. O undă electromagnetică este întotdeauna emisă sub forma unui grup de unde avînd un front în față și un front în spate, o lungime l, o durată de emisie τ și o lățime spectrală $\delta\nu$, toate trei finite, aceste mărimi fiind legate între ele prin relațiile $l = c\tau$ și $\delta\nu \cdot \tau \simeq 1$. Aceste idei, atît de clasice în optica

ondulatorie, trebuie să fie, după părerea mea, în mod obligatoriu păstrate în cadrul noilor teorii și din acest motiv asimilarea cîmpului electromagnetic cu un ansamblu de oscilatori armonici, care e adeseori luată ca bază a teoriei cuantice a cîmpurilor, mi s-a părut întotdeauna îndoielnică.

Firește, trebuie să admitem postulatul, rămas pînă acum fără justificare precisă, că o undă de bază nu poate purta decît un singur corpuscul în cazul fermionilor, dar poate purta un număr oarecare de corpusculi în cazul bosonilor. Acest din urmă caz este singurul care ne interesează aici fiindcă fotonii sînt bosoni.

Undele hertziene

Undele hertziene sînt formate din grupuri de unde de mare lungime, putînd atinge sute de kilometri și purtînd un număr enorm de fotoni. Prezența fotonilor în grupurile de unde hertziene nu este îndoielnică fiindcă ele intervin în funcționarea maserilor. La prima privire, poate părea extraordinar faptul că toate problemele privind undele hertziene pot fi foarte exact tratate folosindu-se numai ecuațiile lui Maxwell și aceasta chiar în domeniul hiperfrecvențelor pînă la undele milimetrice. O validitate atît de largă a teoriei clasice a undelor poate părea greu conciliabilă cu existența fotonilor, dar teoria dublei soluții, care afirmă că fotonii hertzieni sînt purtați de o undă electromagnetică de bază de foarte mică amplitudine, care impune faza sa vibrației interne a fotonilor, ni se pare a aduce o foarte interesantă rezolvare a acestei dificultăți.

Să considerăm un radio-receptor conținînd un organ susceptibil de a intra în oscilație sub acțiunea unei unde hertziene incidente, acest organ putînd fi o antenă, un circuit oscilant, o cavitate rezonantă etc. Unda de bază care transportă fotonii pe care o vom presupune de forma $a \sin 2\pi\nu \left(t - \frac{r}{c}\right)$, r fiind considerat în direcția de propagare, are o am-

plitudine mult prea mică pentru a pune receptorul în oscilație, dar fotonii pe care îi poartă, fiind în fază cu ea, aduc receptorului „eșantioane" ale unei unde $Ca \sin 2\pi\nu\left(t - \frac{r}{c}\right)$ cu C foarte mare. Sosirea acestor eșantioane comunică receptorului impulsuri ritmate susceptibile să-l facă să intre în oscilație uniformă. Această punere în oscilație a unui receptor prin sosirea succesivă de eșantioane ale unei unde sinusoidale este clasică în tehnica radioelectrică și aici se face cu ea pur și simplu o aplicație de un gen special adaptată structurii fotonice a radiațiilor hertziene. Această concepție a structurii unei unde hertziene și a acțiunii sale asupra unui receptor este, cred, cu totul caracteristică noilor orizonturi pe care ni le deschide interpretarea coexistenței undelor și corpusculilor de către teoria dublei soluții.

Lumina emisă de sursele obișnuite și de laseri

În sursele obișnuite de lumină, atomii (sau moleculele) emit independent unii de alții grupuri de unde de lungime destul de mică (de ordinul metrului), lungime ce poate fi măsurată experimental: fiecare din aceste grupuri de unde transportă în momentul emisiei sale un singur foton produs de tranziția cuantică pe care a suferit-o atomul din care iese el. Dacă sursa este de o intensitate foarte slabă, lumina trimisă de ea pe un aparat de interferență va sosi sub forma unor grupuri de unde izolate purtînd fiecare un singur foton. Celebrele experiențe efectuate mai întîi de Taylor în 1909, apoi de Dempster și Batho în 1928 au arătat că, în acest caz, se obțineau în final, după o expunere destul de lungă, aceleași fenomene de interferență ca și cu o lumină intensă și o expunere scurtă[1]. Aceasta dovedește

[1] Un rezultat analog a fost obținut cu electroni la Toulouse, în laboratorul lui Dupouy, de către Faget, în teza sa de doctorat.

indiscutabil că fiecare foton ajunge în aparatul de interferență purtat de un grup de unde susceptibil să interfereze cu el însuși.

Cînd se folosește o sursă de lumină intensă, cum e cazul uzual, grupurile de unde de aceeași frecvență emise de diverși atomi ai sursei se suprapun, iar unda ce rezultă din această suprapunere e aceea care, în concepțiile mele, ghidează fotonii emiși și le impune faza sa locală. Există deci în acest caz o „coerență" a fotonilor între ei, dar această coerență nu e decît parțială și temporară, deoarece, grupurile de unde de bază nefiind emise de atomi decît în cursul unei durate de o sutime de microsecundă, componentele undei rezultante se schimbă continuu, apărînd și dispărînd succesiv. Astfel se explică succesul teoriei coerenței cînd este aplicată la formarea imaginilor furnizate de instrumentele optice. Aceeași concepție ne permite de asemenea să interpretăm foarte simplu curiosul fenomen de corelație a intensităților provenind din două surse depărtate și observate în puncte diferite (interferențe de ordinul al doilea) evidențiate în ultimii ani de către Handbury Brown și Twiss. Din nou, succesul interpretărilor prin teoria ondulatorie clasică a fenomenelor, de care am vorbit adineauri, confirmă validitatea acestei teorii în domenii în care ea putea să pară destul de îndoielnică.

De o natură foarte diferită este lumina care doar de cîțiva ani poate fi obținută cu ajutorul laserilor. Funcționarea laserilor, precum și a maserilor de invenție ceva mai puțin recentă, se bazează în esență pe remarcabila concepție a emisiilor spontane și a emisiilor stimulate ale atomilor, introdusă de Einstein într-o celebră lucrare din 1917. Prin mecanismul emisiilor stimulate se ajunge a se obține cu laseri un grup foarte lung de unde luminoase purtînd un număr considerabil de fotoni, adică un grup de unde a căror structură seamănă mult mai mult cu aceea a undelor hertziene decît cu structura undelor emise de sursele obișnuite de lumină. Studiul laserilor a evidențiat, într-adevăr, un aspect

foarte important: în timp ce emisiile spontane au loc fără nici o interacțiune a atomului emițător cu exteriorul (să nu uităm însă că el se află întotdeauna în interacțiune cu mediul subcuantic!) și sînt total independente și incoerente, emisiile stimulate sînt provocate în laseri de trecerea unui grup de unde incident pe un ansamblu de atomi și ele sînt coerente între ele, adică în concepția mea că atomii depun fotonii pe care îi emit pe unda electromagnetică de bază care îi traversează. Toți fotonii emiși prin emisie stimulată se află astfel în fază cu unda de bază care îi transportă. Această deosebire de natură între emisiile spontane și emisiile stimulate nu apărea în raționamentul inițial al lui Einstein deoarece acest raționament se referea la radiația corpului negru care, prin însăși definiția sa, este în esență aleatorie și incoerentă.

Noțiunea de coerență a fotonilor emiși de un ansamblu de atomi, a cărei importanță se afirmă aici, nu poate fi definită decît prin intervenția unui acord de fază al fotonilor cu o undă (*care nu este în mod necesar monocromatică plană*): ea implică deci existența unui cîmp ondulatoriu fiziceşte real și întins, care acoperă ansamblul atomilor a căror emisie o stimulează și care transportă fotoni în fază cu el. Interpretarea fenomenelor de coerență (cu ajutorul elementelor nediagonale a matricei densitate) adoptată de teoria cuantică a cîmpurilor folosește formule care sînt fără îndoială exacte, dar care, după părerea mea, nu pot face înțeleasă natura fizică reală a coerenței.

Stări staționare și stări precursoare

Vom încheia cu probleme care fac obiectul preocupărilor mele actuale, dar pe care aici nu le pot menționa decît în treacăt.

Din teoria atomului a lui Bohr (1913) se știe că emisia liniilor spectrale de către atomi are loc atunci cînd atomul suferă o „tranziție cuantică“ care îl

face să treacă brusc dintr-o stare staționară de energie E_1 într-o stare staționară de mai mică energie E_2 cu emisia unui foton de frecvența $\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$. Începînd de atunci, s-a admis totdeauna în acord cu Bohr că tranziția cuantică este ceva ce scapă oricărei descrieri în termeni de spațiu și de timp.

În teoria dublei soluții, ideea că adevărata ecuație a undei u reprezentînd electronii atomului cu unda lor de bază este neliniară permite să se ia în considerare ipoteza că stările staționare ar fi niște cicluri limite analoge acelora pe care le întîlnim frecvent în teoriile neliniare și că tranzițiile cuantice ar fi niște treceri bruște și foarte rapide de la un ciclu limită la altul: faptul că tranzițiile sînt procese neliniare ar explica de ce par ele imposibil de a fi reprezentate în cadrul teoriilor liniare uzuale. Această foarte interesantă idee a fost luată în considerare cu cîțiva ani în urmă de Destouches și Cap, apoi a fost reluată și dezvoltată de micul grup de cercetători care lucrează cu mine, și anume de Andrade e Silva și Lochak. Considerată din punctul de vedere al termodinamicii ascunse a particulelor, pe care am dezvoltat-o recent, această problemă prezintă aspecte foarte interesante asupra cărora nu pot insista aici.

Destul de recent m-a izbit următorul fapt. Cînd dezvoltăm, în cadrul ideilor actualmente admise, teoria lărgimii liniilor spectrale[1], sîntem conduși să atribuim diverselor niveluri de energie ale unui atom o anumită lărgime și ajungem la o concluzie care, exprimată pe baza ideilor considerate astăzi ca ortodoxe, poate fi formulată după cum urmează: lărgimea spectrală a unei linii emise cu ocazia unei tranziții cuantice depinde nu numai de tranziția ce a avut loc, ci și de toate acele ce ar fi putut să se producă, dar nu s-au produs. Experiența confirmă această previziune, însă interpretarea ce i se dă

[1] A se vedea, de exemplu, Heitler, *Quantum theory of radiation*, Oxford Clarendon Press, ed. a 5-a, 1954, p. 181 și urm.

mi se pare cu totul paradoxală: într-adevăr, un fenomen fizic observabil nu poate depinde de fenomene fizice care erau posibile, dar care nu s-au produs. Reflectînd la această dificultate, am ajuns la ideea că calculul lărgimii liniilor spectrale, interpretat în mod obișnuit ca unul care ne dă numai o reprezentare de probabilități, este în realitate descrierea unei stări fizice a atomului ce precede tranziția cuantică: această „stare precursoare" poate fi considerată, în cadrul ideilor menționate mai sus, ca o mică variație calculabilă liniar deoarece e mică în raport cu ciclul limită care constituie starea staționară inițială[1].

Nu voi insista mai mult asupra acestei teorii a stărilor precursoare care este, la ora actuală, abia schițată: scopul ei este de a înlocui reprezentările de probabilități, dealtfel fără îndoială exacte, oferite de teoriile actuale, printr-o imagine precisă a evoluției reale a stărilor atomului. Ea ar trebui, de asemenea, să ajungă să ne furnizeze o imagine a fenomenelor de emisie, eliberată de paradoxul semnalat mai sus. Ea ar trebui, în sfîrșit, să ne determine să interpretăm, într-un mod foarte diferit de cel al actualei teorii cuantice a cîmpurilor, și, după părerea mea, mult mai apropiat de realitatea fizică, multe alte fenomene ca, de exemplu, ușoara deplasare a nivelurilor de energie ale unui atom sub influența unei radiații luminoase incidente, evidențiată experimental în frumoasa lucrare recentă a lui Cohen Tannoudji, precum și fenomenele atît de curioase descoperite recent și desemnate sub denumirea de optică neliniară.

Concluzie

Imaginile realității fizice pe care ni le oferă teoria ondulatorie a radiațiilor, sub forma ei electromagnetică, în domeniul undelor hertziene și luminoase posedă o validitate foarte largă, mult mai

[1] În favoarea acestei concepții a stărilor precursoare pot fi prezentate și alte argumente.

largă chiar decît aceea a cărei existenţă ne-a revelat-o în 1916 principiul de corespondenţă al lui Bohr. Această validitate poate părea în contradicţie cu prezenţa, totuşi certă, a fotonilor în structura acestor unde. Teoria dublei soluţii, reprezentîndu-ne fotonii ca nişte regiuni foarte mici, cu o foarte mare amplitudine ondulatorie, grefate pe o undă electromagnetică de bază de o foarte mică amplitudine, ne aduce o soluţie, poate chiar singura soluţie, a acestei probleme dificile. Dar putem oare înţelege ca o undă, a cărei amplitudine e atît de mică încît existenţa ei nu a putut fi niciodată (cel puţin pînă în prezent) decelată prin efecte energetice observabile, să poată fi un element indispensabil al unei bune reprezentări a realităţii fizice? După mine, motivul este că această undă atît de slabă e aceea care transportă fotonii, care ghidează mişcarea lor reglînd repartiţia lor statistică în spaţiu şi *care le impune faza sa* explicînd astfel eventuala lor coerenţă.

BIBLIOGRAFIE

1. *Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la Mécanique ondulatoire: la théorie de la double solution*, Gauthier-Villars, Paris, 1956.

2. *La théorie de la Mesure en Mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris, 1957.

3. *L'interprétation de la Mécanique ondulatoire* (*Journal de Physique*, vol. 20, decembrie 1959, p. 963).

4. *Remarques sur la dualité des ondes et des corpuscules* (*Cahiers de Physique* nr. 147, octombrie 1962, p. 425).

5. *Étude critique de l'interprétation actuelle de la Mécanique ondulatoire*, Gauthier-Villars, Paris, 1963.

6. *La Thermodynamique de la particule isolée (Thermodynamique cachée des particules)*, Gauthier-Villars, Paris, 1964.

7. *Ondes électromagnétiques et photons* (*C.R. Acad. Sc.*, Paris, vol. 258, p. 6 345, 29 iunie 1964), şi lucrarea în pregătire pe aceeaşi temă.

COMPTES RENDUS
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES
Grupa 4
(Paris, vol. 260, p. 6041—6043, 9 iunie 1965)

Fizica teoretică. — *Despre relaţia de incertitudine* $\delta n \cdot \delta\varphi \geqslant 2\pi$. Nota[1] d-lui Louis de Broglie, membru al Academiei.

Folosind ideile sale asupra coexistenţei undelor şi fotonilor în structura radiaţiilor, autorul propune o interpretare a relaţiei de incertitudine $\delta n \cdot \delta\varphi \geqslant 2\pi$ a cărei adevărată semnificaţie a rămas pînă în prezent destul de misterioasă.

Teoria celei de-a doua cuantificări şi teoria cuantică a cîmpurilor care decurge din ea au condus la admiterea validităţii relaţiei de incertitudine între numărul de fotoni purtaţi de o undă electromagnetică şi faza sa

$$\delta n \cdot \delta\varphi \geqslant 2\pi. \tag{1}$$

S-a căutat legarea acestei relaţii cu a 4-a relaţie de incertitudine a lui Heisenberg a cărei interpretare veritabilă a fost şi ea destul de discutată. Raţionamentul propus pentru a lega aceasta a 4-a relaţie de incertitudine

$$\delta W \cdot \delta t \geqslant h \tag{2}$$

cu relaţia (1) este următorul. Fie un grup de unde de frecvenţă ν transportînd n fotoni. Dacă incertitudinea asupra lui n este δn, incertitudinea asupra energiei este $\delta W = \delta n \cdot h\nu$. Pe de altă parte, se poate scrie $\delta\varphi = 2\pi\nu\delta t$, unde δt este considerat ca o incertitudine asupra timpului.

[1] Şedinţa din 31 mai 1965.

Avem atunci $\delta n \cdot \delta\varphi = (2\pi/h)\ \delta W \cdot \delta t$ şi din (2) se deduce (1).

Această demonstraţie nu mi se mai pare azi satisfăcătoare. În primul rînd a 4-a relaţie de incertitudine (2) se deduce din relaţia *necuantică* $\delta\nu \cdot \delta t \geqslant 1$, care este clasică în teoria undelor, şi înmulţind această inegalitate cu h se obţine (2). Or, nu avem dreptul să admitem că $\delta W = \delta n \cdot h\nu$ şi să introducem acest δW în (2) fiindcă incertitudinea δW din (2) provine în realitate din lărgimea spectrală $\delta\nu$ şi nu dintr-o incertitudine asupra numărului de fotoni (fără intervenţia lărgimii spectrale). Pe de altă parte, în relaţia $\delta\nu \cdot \delta t \geqslant 1$ din care derivă (2), δt nu este o incertitudine asupra coordonatei timp, ea este durata trecerii grupului de unde într-un punct al spaţiului sau, dacă preferaţi, este durata τ a emisiei grupului de unde de către sursă. Mi se pare deci că demonstraţia amintită mai sus se bazează pe confuzii.

Pentru a afla adevărata semnificaţie a relaţiei (1), mi se pare că trebuie pornit de la următoarea idee: în toate relaţiile de incertitudine ale teoriei cuantice referitoare la un produs de forma $\delta a \times \times \delta b$, incertitudinile sînt incertitudini asupra rezultatului unei măsurători a mărimii corespunzătoare, cele două mărimi a şi b nefiind simultan măsurabile cu precizie în cadrul aceluiaşi proces de măsurare.

Putem aplica această idee la relaţia (1) deoarece n şi φ nu sînt măsurabile simultan. Într-adevăr, pentru a măsura pe n, ar trebui ca cei n fotoni purtaţi de undă să fi făcuţi să producă efecte fotoelectrice separate şi numărabile. Din contră, pentru a înregistra faza, trebuie să-i facem pe fotonii grupului de unde *să coopereze* la producerea unei oscilaţii într-un sistem de genul circuitului oscilant, al cavităţii rezonante etc., aşa cum am explicat-o într-o notă anterioară[1]; or, această operaţie nu este compatibilă cu o numărare a

[1] *Comptes Rendus*, 258, 1964, p. 63 45. (A se vedea şi p. 117—118 din art. precedent).

fotonilor. Sînt deci îndeplinite condițiile pentru ca să existe o relație de incertitudine între n și φ.

Pentru a preciza punctul nostru de vedere, vom căuta să imaginăm un procedeu de măsurare astfel încît incertitudinile δn și $\delta\varphi$ să poată avea amîndouă o valoare finită. Fie un grup de unde purtînd un număr *necunoscut* n de fotoni și avînd o lărgime spectrală $\delta\nu$ legată de durata de emisie τ prin relația clasică

$$\delta\nu \cdot \tau \simeq 1. \tag{3}$$

Dacă vrem să încercăm să determinăm în același timp, cu cea mai mare precizie posibilă, numărul de fotoni și faza undei, trebuie să facem ca un grup de unde să traverseze un dispozitiv în care se produc efecte fotonice de natură cuantică și, în principiu, numărabile, apoi să-l facem să ajungă pe un sistem capabil să oscileze, înregistrînd faza.

Dacă atunci, în dispozitivul de numărare a fotonilor apăruți prin efectul fotoelectric, observăm m efecte, pe sistemul oscilant vor ajunge numai $\delta n = n - m$ fotoni, δn fiind necunoscut deoarece n este necunoscut. Dacă cei δn fotoni în chestiune acționează asupra circuitului oscilant prin impulsuri succesive ritmate pe faza undei, așa cum am explicat în nota citată mai sus, este rezonabil să admitem că sistemul oscilant nu va putea să înceapă să oscileze uniform decît dacă primește cel puțin un impuls pe perioadă. Aceasta ne conduce să scriem $\delta n \cdot (T/\tau) \geqslant 1$ sau, după (3),

$$\delta n \geqslant \frac{\nu}{\delta\nu}. \tag{4}$$

Acum însă trebuie să definim ceea ce numim incertitudinea $\delta\varphi$. Propunem să o facem în modul următor. Dacă unda ar fi strict monocromatică, variația fazei sale în cursul unei perioade $T = 1/\nu$ ar fi egală cu 2π, ceea ce înseamnă că ea nu ar varia fiindcă nu e definită decît cu aproape 2π. În realitate însă, grupul de unde are întotdeauna o lăr-

gime spectrală $\delta\nu$ şi variaţia fazei pentru frecvenţa $\nu + \delta\nu$ în timpul T va fi (pînă la 2π)

$$\delta\varphi = 2\pi\delta\nu T = 2\pi\frac{\delta\nu}{\nu}. \tag{5}$$

Dacă admitem că $\delta\varphi$ definit prin (5) poate fi considerat ca incertitudinea asupra valorii fazei, compararea formulelor(4) şi (5) ne dă imediat relaţia (1) care astfel corespunde într-adevăr unei experienţe în care s-a căutat să se determine simultan, dar în mod necesar cu o anumită imprecizie, numărul n al fotonilor purtaţi de grupul de unde şi valoarea fazei sale.

Raţionamentul pe care l-am expus mai sus ne-a permis să regăsim relaţia (1) fără să fi recurs deloc la a 4-a relaţie de incertitudine a lui Heisenberg. Relaţia (1) ne apare aici ca rezultînd exclusiv din ipoteza că sistemul oscilant suportă impulsuri discontinui datorate incidenţelor succesive ale fotonilor purtaţi de grupul de unde, fotoni care sînt încorporaţi în acest grup de unde şi au o vibraţie interioară ritmată de vibraţia undei. Demonstraţia noastră despre relaţia (1) decurge astfel din ideile generale la care ne-a adus concepţia noastră asupra coexistenţei fotonilor şi undelor în radiaţii.

Trebuie să adăugăm următoarea remarcă importantă relativ la definiţia (5) pe care am adoptat-o pentru $\delta\varphi$: mărimea $\delta\varphi$ nu trebuie să fie definită cu ajutorul fazei unei unde plane monocromatice, caz ideal care nu e niciodată realizat fizic, ci considerînd un grup de unde de lungime finită avînd o lărgime spectrală $\delta\nu$. Mărimea $\delta\varphi$ definită prin (5) măsoară deci într-un fel „lipsa de monocromaticitate“ a grupului de unde şi acesta ar fi veritabilul ei sens. Cu alte cuvinte, adevărata semnificaţie a lui $\delta\varphi$ din relaţia (1) nu ar trebui căutată în existenţa unei incertitudini asupra fazei unei unde plane monocromatice, ci în faptul că întotdeauna avem de-a face cu un grup de unde avînd o lărgime spectrală $\delta\nu$ nenulă.

Din acest punct de vedere este interesant să punem definiţia (5) în legătură cu următorul fapt: folosind limbajul radioelectricienilor, se poate spune că, pentru a înregistra exact compoziţia spectrală a undei incidente, sistemul oscilant folosit trebuie să aibă o „calitate“ Q astfel încît „banda sa de trecere“ $\Delta\nu$, dată de relaţia $\Delta\nu/\nu = \alpha/Q$ (unde α este un coeficient de ordinul unităţii), să fie cel puţin egală cu lărgimea spectrală $\delta\nu$ a undei.

TERMODINAMICA „ASCUNSĂ“ A PARTICULELOR

Interpretarea mecanicii ondulatorii

La sfîrşitul verii 1963 s-au împlinit 40 de ani de cînd am simţit nevoia de a extinde la toate particulele dublul aspect ondulatoriu şi corpuscular pe care Einstein, în 1905, ni l-a revelat pentru lumină în teoria sa despre cuantele de lumină. După cum se poate constata, recitind teza de doctorat susţinută de mine la sfîrşitul anului 1924, a cărei reeditare a fost terminată acum, scopul meu era să obţin o imagine sintetică în care corpusculul, considerat dintotdeauna ca un mic obiect localizat, deplasîndu-se în general în spaţiu în decursul timpului, ar fi încorporat unei unde cu caracter fizic, astfel încît mişcarea sa să fie legată de propagarea undei.

Una dintre observaţiile esenţiale de la care am pornit, şi care nu e niciodată menţionată astăzi în cărţile ce expun mecanica cuantică, este deosebirea dintre transformarea relativistă a frecvenţei unei unde şi aceea a frecvenţei unui orologiu. Este bine cunoscut că, dacă frecvenţa unui orologiu considerată în sistemul său propriu este ν_0, frecvenţa pe care i-o atribuie un observator care îl vede trecînd cu viteza $v = \beta c$ este $\nu_c = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$: aceasta e ceea ce se numeşte fenomenul de „încetinire a orologiilor“ prin mişcarea lor. Din contră, dacă o undă, într-un anumit sistem de referinţă, este o undă staţionară de frecvenţă ν_0, această

undă observată într-un sistem de referință animat de viteza $v = \beta c$ în raport cu primul apare ca o undă progresivă ce se propagă în sensul mișcării relative, cu frecvența $\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ și cu viteza de fază $V = \frac{c}{\beta} = \frac{c^2}{v}$. Dacă i se atribuie corpusculului, cum o sugerează relația fundamentală a cuantei $W = h\nu$, o frecvență internă $\nu_0 = \frac{m_0 c^2}{h}$ și dacă se admite că în sistemul propriu al corpusculului unda care îi este asociată este o undă staționară de frecvență ν_0, toate formulele fundamentale ale mecanicii ondulatorii, și în special celebra formulă $\lambda = \frac{h}{p}$, în care p este cantitatea de mișcare a corpusculului, se deduc de îndată din observațiile precedente.

Întrucît eu consideram corpusculul ca fiind localizat în mod constant în undă, am sesizat următoarea consecință: mișcarea corpusculului e de o asemenea natură, încît asigură concordanța permanentă dintre faza undei progresive care îl înconjură și faza internă a corpusculului considerat ca un mic orologiu. Această relație se verifică de îndată în cazul simplu al unui corpuscul în mișcare uniformă, însoțit de o undă plană monocromatică, pe care am studiat-o în principal în teza mea. După teza mea, aprofundînd această idee, am fost condus să cred că, atunci cînd unda are forma generală

$$\Psi = a(x, y, z, t)e^{\frac{2\pi i}{h}\varphi(x, y, z, t)}$$

în care a și φ sînt reale, concordanța de fază între corpuscul și unda sa cere ca viteza corpusculului în fiecare punct al traiectoriei sale să fie dată de

$$\vec{v} = -\frac{1}{m}\overrightarrow{\text{grad}}\ \varphi.$$

Această concepție se întîlnea cu aceea pe care, în aceeași epocă, o dezvolta Madelung, care compara

propagarea undei Ψ din mecanica ondulatorie cu curgerea unui fluid fictiv avînd o densitate $\rho = |\Psi|^2$ şi o viteză

$$\vec{v} = -\frac{1}{m} \overrightarrow{\text{grad}}\ \varphi.$$

Ca şi imaginea hidrodinamică a lui Madelung, ipoteza mea privind mişcarea corpusculului se exprima spunînd că traiectoria acestuia coincide cu una din liniile de curent ale fluidului hidrodinamic al lui Madelung. Se ajungea aşadar să se considere că propagarea undei impune corpusculului o mişcare determinată: e ceea ce am denumit „teoria undei-pilot".

Am fost apoi nevoit să depăşesc acest prim punct de vedere. După părerea mea, nu era suficient de a suprapune corpusculul cu unda, impunîndu-i să fie ghidat de propagarea acesteia: trebuia să ne reprezentăm corpusculul ca *încorporat* undei, ca făcînd parte din structura ei. Am fost astfel condus la ceea ce am numit „teoria dublei soluţii": ea admite că unda reală nu este omogenă, că ea comportă o foarte mică regiune de înaltă concentrare a cîmpului care constituie corpusculul în sensul îngust al cuvîntului, dar că, în afara acestei foarte mici regiuni, această undă coincidea sensibil cu unda omogenă concepută de mecanica ondulatorie uzuală. Am expus atunci primele baze ale acestei concepţii noi într-un articol în *Journal de Physique* din mai 1927.

Din nefericire, această încercare în care nu introduceam încă ideea unui caracter neliniar al ecuaţiei de unde a undei reale se lovea de numeroase dificultăţi. Am expus de cîteva ori, în altă parte, cum, în urma Consiliului Solvay din octombrie 1927, am abandonat această încercare şi m-am raliat, cel puţin cu titlu provizoriu, interpretării Şcolii de la Copenhaga, însă în anii ce au urmat am păstrat totdeauna un mod de expunere mult mai „obiectiv" decît cele care erau folosite din ce în ce mai des, pentru a nu mă îndepărta prea mult de intuiţiile mele iniţiale. În 1951, după ce am ţinut în

anii precedenţi cursuri despre interpretarea mecanicii ondulatorii, fiind nevoit să trec în revistă obiecţiile ridicate de oameni de ştiinţă ca Einstein, Schrödinger şi alţii împotriva interpretării uzuale, mă aflam într-o stare de spirit favorabilă unei reveniri la vechile mele concepţii: lucrările lui David Bohm, de care luasem cunoştinţă atunci, şi îndelungatele discuţii asupra acestei probleme cu Jean-Pierre Vigier m-au determinat să reiau teoria dublei soluţii introducînd în ea ideea neliniarităţii.

Nu pot dezvolta aici progresele realizate în ultimii ani în interpretarea mecanicii ondulatorii prin teoria dublei soluţii. Dezvoltarea ei progresivă va putea fi urmărită consultîndu-se două lucrări pe care le-am publicat la Gauthier-Villars în 1956 şi 1957 şi un articol publicat în *Journal de Physique* în decembrie 1960. Am publicat de curînd, tot la Gauthier-Villars, un volum consacrat unei critici minuţioase a unei serii de mici erori de interpretare care mi se par a fi contribuit la orientarea fizicii cuantice pe o cale greşită. Nu vreau să omit a sublinia sprijinul continuu pe care Andrade e Silva mi l-a dat în munca mea în decursul ultimilor ani prin finețea analizelor sale şi mai ales la redactarea ultimei mele cărţi.

Superpoziţia unei mişcări aleatorii la mişcarea uniformă a „ghidării"

Am văzut că în teoria dublei soluţii (sau a undei-pilot) determinăm mişcarea corpusculului în sînul undei sale, exprimată sub forma $a\,e^{\frac{2\pi i}{h}\varphi}$, admiţînd că viteza sa este dată de formula ghidării:

$$\vec{v} = -\frac{1}{m}\,\overrightarrow{\text{grad}}\,\varphi, \tag{1}$$

m fiind masa corpusculului. Această formă a formulei ghidării nu e valabilă decît în mecanica ondulatorie nerelativistă corespunzînd ecuaţiei de propagare a lui Schrödinger. În mecanica ondula-

torie relativistă corespunzînd ecuației de propagare a lui Klein-Gordon, formula ghidării pentru o particulă cu sarcină electrică ε, plasată într-un cîmp electromagnetic derivînd dintr-un potențial scalar V și dintr-un potențial vector $\vec{A}$, ia forma

$$\vec{v} = -c^2 \frac{\overrightarrow{\text{grad}}\,\varphi + \frac{\varepsilon}{c}\vec{A}}{\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \varepsilon V} \tag{2}$$

care, cu aproximarea newtoniană, se reduce într-adevăr la forma (1). În cazul particulelor cu spin (de exemplu, pentru electronul lui Dirac), formula ghidării se va deduce scriind totdeauna că particula urmează una din liniile de curent ale curgerii hidrodinamice care corespunde ecuațiilor de propagare.

Cred că fenomenul ghidării particulei de către cîmpul (ondulatoriu) înconjurător rezultă, ca în teoria relativității generale, din faptul că ecuațiile cîmpului sînt neliniare și că această neliniaritate, care se manifestă aproape exclusiv în regiunea corpusculară, solidarizează mișcarea particulei cu propagarea undei înconjurătoare. Folosind o metodă analogă aceleia pe care o folosise cîndva Georges Darmois pentru a justifica „postulatul geodezicelor" în teoria relativității generale și care a fost dezvoltată de Lichnerowicz, corpusculul poate fi reprezentat aproximativ ca o singularitate a cîmpului ondulatoriu și se poate demonstra că, pentru motive de continuitate, singularitatea în mișcarea lui trebuie să rămînă mereu închisă în interiorul unui tub infinit de subțire de linii de curent ale cîmpului exterior. Nu pot însă stărui aici asupra acestei justificări a formulei ghidării.

Există însă o consecință a formulei ghidării asupra căreia trebuie să insist. Chiar atunci cînd o particulă nu e supusă nici unui cîmp exterior, dacă unda care o înconjură nu este o undă sensibil plană și monocromatică (deci dacă această undă trebuie să fie reprezentată printr-o superpoziție

de unde plane monocromatice), mişcarea pe care i-o impune formula ghidării nu e rectilinie şi uniformă. Aceasta m-a făcut să cred, începînd din 1927, că corpusculul era supus, din partea undei înconjurătoare, unei forţe care îi curba traiectoria: această „forţă cuantică" ar fi egală cu gradientul cu semn schimbat al unui potenţial cuantic Q a cărui expresie în mecanica ondulatorie nerelativistă este:

$$Q = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\frac{\Delta a}{a}. \tag{3}$$

În mecanica ondulatorie relativistă însă trebuie considerat că forţa cuantică este egală cu gradientul cu semn schimbat al cantităţii

$$M_0 c^2 = \sqrt{m_0^2 c^4 + \frac{h^2 c^2}{4\pi^2}\frac{\Box a}{a}} \left(\Box = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right). \tag{4}$$

Întrucît potenţialul cuantic Q e definit abstracţie făcînd de o constantă, se poate scrie

$$Q = M_0 c^2 - m_0 c^2. \tag{5}$$

Cantitatea M_0, care e în general funcţie de x, y, z şi t şi care, atunci cînd Q este zero, se reduce la masa proprie constantă m_0 atribuită de obicei particulei, poate fi denumită „masa proprie variabilă" a particulei: ea va juca un mare rol în cele ce urmează. Dealtfel, e foarte uşor de verificat că definiţia (5), ţinînd cont de valoarea (4) a lui M_0, se reduce în aproximaţia newtoniană la definiţia (3).

Teoria ghidării, care foloseşte formulele pe care le-am precizat adineauri, impune particulei o mişcare bine determinată atunci cînd se stabileşte poziţia sa în undă la un moment iniţial dat. Acesta era punctul de vedere pe care l-am adoptat iniţial în 1927 şi la care mă menţineam încă atunci cînd am reluat teoria dublei soluţii, în urmă cu doisprezece ani. Curînd însă mi-a apărut cu o evidenţă crescîndă că această concepţie nu era suficientă şi că mişcării uniforme şi într-un fel „medii" a particulei pe care o defineşte formula ghidării

trebuia să i se suprapună un gen de mişcare „brownoidă“ cu caracter aleatoriu.

Pentru a ne da seama de necesitatea de a introduce acest nou element în teorie, trebuie să ne amintim că dacă ρ reprezintă densitatea fluidului fictiv în imaginea hidrodinamică a propagării undelor, densitate care, în mecanica ondulatorie nerelativistă, este egală cu $|\Psi(x, y, z, t)|^2$, am fost determinaţi să considerăm că cantitatea $\rho\, d\tau$ dă probabilitatea prezenţei particulei în momentul t în elementul de volum $d\tau$ al spaţiului fizic. Pentru a încerca să justificăm acest rezultat în teoria dublei soluţii, se poate porni de la ecuaţia de continuitate a fluidului fictiv

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} (\overrightarrow{\rho v}) = 0, \tag{6}$$

ecuaţie în care $\vec{v}$ este tocmai viteza de ghidare. Dacă examinăm mişcarea unui element de volum $d\tau$ care conţine totdeauna aceleaşi elemente ale fluidului, vedem că ecuaţia (6) care, cu o notaţie bine cunoscută în hidrodinamică, se poate scrie

$$\frac{D}{Dt} (\rho\, d\tau) = 0 \tag{7}$$

exprimă conservarea în decursul timpului a produsului $\rho\, d\tau$. După cum în mecanica statistică clasică, teorema lui Liouville, care se exprimă prin $\frac{D}{Dt} d\tau = 0$, face a priori foarte verosimil faptul că probabilitatea prezenţei punctului reprezentativ al unui sistem în elementul $d\tau$ al extensiunii-în-fază este proporţională cu mărimea acestui element, tot astfel aici ecuaţia (7) face a priori foarte verosimil faptul că probabilitatea prezenţei particulei în elementul $d\tau$ al spaţiului fizic este proporţională cu $\rho d\tau$. Există o mare analogie între cele două probleme, cu deosebirea totuşi că în mecanica statistică mişcarea este considerată dintr-un punct de vedere reprezentativ în extensiunea-în-fază, pe cînd aici noi considerăm mişcarea unei particule în spaţiul fizic.

Analogia dintre cele două probleme atrage după sine o analogie între dificultăţile întîlnite atunci cînd se examinează cu grijă demonstraţia rezultatului dorit. Şi într-un caz, şi în celălalt, validitatea rezultatului ar cere ca elementul, în cursul mişcării sale, să acopere totalitatea spaţiului (extensiune-în-fază într-un caz, spaţiu fizic în celălalt) care îi este accesibil. Se ştie că, pentru a justifica această ipoteză, sîntem conduşi în mecanica statistică fie să căutăm a demonstra o teoremă de ergodicitate, fie că introducem ca Boltzmann o ipoteză de „haos molecular". În problema care ne preocupă, David Bohm şi Jean-Pierre Vigier au urmat cea de-a doua cale atunci cînd au introdus, în 1954, într-un articol din *Physical Review* ideea „mediului subcuantic", idee care mi-a apărut de îndată ca fiind de o importanţă capitală.

După Bohm şi Vigier ar exista un mediu ascuns, corespunzînd unui nivel mai profund al realităţii fizice decît nivelul cuantic sau microfizic, mediu cu care toate particulele de la nivelul microfizic s-ar afla permanent în interacţiune. Complexitatea acestui mediu, a cărui natură mi se pare prematur să vreau s-o precizez cu exactitate, ar avea drept consecinţă antrenarea caracterului pur aleatoriu al perturbaţiilor pe care acţiunea lui le impune mişcării particulelor microfizice.

Sub influenţa acestor perturbaţii aleatorii continui, pe care i le comunică „mediul subcuantic", particula, în loc să urmeze în mod uniform una din traiectoriile definite de legea ghidării, sare mereu de pe una din aceste traiectorii pe alta, parcurgînd astfel, într-un timp foarte scurt, un foarte mare număr de tronsoane ale acestor traiectorii şi, pe cînd unda rămîne izolată într-o regiune finită a spaţiului, această traiectorie în zig-zag se grăbeşte să exploreze complet toată această regiune. În acest caz se poate justifica afirmaţia că probabilitatea prezenţei particulei într-un element de volum $d\tau$ al spaţiului fizic trebuie să fie luată ca egală cu $|\Psi|^2 d\tau$. E ceea ce au făcut Bohm şi Vigier în memoriul lor: ei au arătat că repartiţia de probabili-

tate în $|\Psi|^2$ trebuie astfel să se facă foarte repede. Andrade e Silva, care a reflectat mult asupra acestui subiect, a legat succesul acestei demonstraţii de proprietăţile „lanţurilor lui Markov".

Fără a insista asupra acestor demonstraţii, aş vrea să dau o imagine care va preciza sensul celor de mai sus. Să considerăm curgerea unui fluid: hidrodinamica defineşte traiectoria unei molecule a acestui fluid care, în fiecare din punctele ei, este tangentă la „linia de curent" care trece prin acest punct şi care, în cazul unei mişcări permanente, coincide cu una din liniile de curent. Or, traiectoria astfel definită nu este decît o traiectorie „ideală" sau „medie" care nu ar putea fi efectiv descrisă decît dacă molecula nu ar suferi nici o perturbaţie. Dar nimic din toate acestea nu se întîmplă: fluidul nefiind niciodată la zero absolut, moleculele sale sînt animate de o agitaţie termică datorată ciocnirilor lor reciproce neîncetate şi, din acest motiv, fiecare dintre ele trece mereu de pe o traiectorie teoretică pe alta. Pentru că moleculele descriu astfel o traiectorie care e continuu în zig-zag, este permis, dacă ρ reprezintă densitatea fluidului, de a considera cantitatea $\rho d\tau$ ca măsurînd probabilitatea prezenţei unei molecule date în elementul $d\tau$.

Pentru a încheia demonstraţia necesităţii de a introduce în teorie perturbaţiile Bohm-Vigier de origine subcuantică, voi considera cazul unui atom de hidrogen într-o stare staţionară de energie E în care funcţia de undă are forma

$$\Psi = a(x, y, z)\, e^{\frac{2\pi i}{h} Et}$$

Formula ghidării ne dă atunci $\vec{v} = 0$: aceasta vrea să spună că electronul este imobil într-un punct al atomului şi se verifică dealtfel uşor că, în acest caz, forţa Coulomb pe care nucleul o exercita asupra electronului este exact echilibrată de forţa cuantică. Dar dacă electronul ar fi astfel imobil, cum s-ar putea înţelege ca probabilitatea prezenţei electro-

nului în orice punct al atomului să fie dată de expresia

$$|\Psi|^2 = |a(x, y, z)|^2 \quad ?$$

Totul se poate explica dacă se admite că electronul, rămînînd „în principiu" imobil, saltă mereu de pe o poziţie pe alta, sub influenţa perturbaţiilor continue de origine subcuantică. Şi acest exemplu demonstrează, într-un mod pregnant, necesitatea de a face ca aceste perturbaţii să intervină în teoria dublei soluţii, adică de a suprapune mişcării uniforme a particulei, prevăzută de teoria ghidării, o mişcare brownoidă cu caracter aleatoriu.

Introducerea ideii unei termodinamici ascunse

Se ştie că la sfîrşitul secolului trecut, datorită îndeosebi lucrărilor lui Boltzmann şi Gibbs, s-a dezvoltat o interpretare statistică a termodinamicii al cărei succes a fost în cele din urmă total. Dar, în aceeaşi perioadă, unii autori, şi mai cu seamă Helmholtz şi Boltzmann însuşi, au căutat, cu un anumit succes, să facă apropieri între mărimile introduse de termodinamică şi anumite mărimi ale mecanicii clasice fără nici o intervenţie a consideraţiilor statistice. Aceste încercări interesante au fost apoi destul de mult date uitării şi nu au mai fost deloc folosite decît în teoria invarianţilor adiabatici (Léon Brillouin).

În cursul anilor 1946—1948 am reluat în Notele publicate în *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, într-un curs la Institutul Henri Poincaré şi într-un articol din *Cahiers de Physique* analiza vechilor mele lucrări şi, firește, am încercat să le apropii de concepţiile mecanicii ondulatorii. Am fost astfel obligat să definesc pentru o particulă în mişcare cu viteza βc o temperatură T, legată de frecvenţa ciclică internă a particulei care, precum am văzut, este dată de

$$\nu_c = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{m_0 c^2}{h} \sqrt{1 - \beta^2}$$

prin relaţia

$$kT = h\nu_c ,$$

în care k este constanta lui Boltzmann. Am fost de asemenea determinat să definesc o entropie pornind de la acţiunea particulei în sensul mecanicii. Aceste analogii nu-mi dădeau deplină satisfacţie, dar mi se păreau foarte curioase. De aceea mi-am terminat articolul din *Cahiers de Physique* din ianuarie 1948 cu următoarea frază, marcată de o anumită ezitare: „Există aici amorsa unei termodinamici a punctului material pe care am putea să căutăm să o dezvoltăm în cadrul mecanicii ondulatorii: este destul de greu de spus unde ar putea duce acest drum, dar noi ne vom mulţumi că i-am indicat punctul de plecare".

De unde provenea ezitarea pe care această frază o lăsa să transpară? Ea venea din faptul că, convins că termodinamica este în esenţă de origine statistică şi nu are sens decît pentru sisteme foarte complexe, nu eram în stare să înţeleg cum ar putea exista o termodinamică valabilă pentru o particulă presupusă izolată şi de aceea, timp de cîţiva ani, am renunţat la încercările menite să dezvolte o teorie de acest gen.

Acum doi ani însă am hotărît să revin la studiul ideilor care, totuşi, îmi reţinuseră puternic atenţia. Or, la acea epocă, după ce reluasem de cîţiva ani reflecţiile mele asupra teoriei dublei soluţii, admiteam existenţa mediului subcuantic. Foarte curînd, mi-a venit brusc în minte o idee. Dacă orice particulă care ne apare izolată la scară microscopică poate să schimbe continuu energie şi cantitate de mişcare cu mediul subcuantic, acesta joacă rolul unui „termostat ascuns" cu care particula este continuu în contact energetic. În consecinţă, a voi să dezvoltăm o termodinamică a particulei izolate nu mai prezintă a priori nici un paradox. E ceea ce am încercat să fac în prima Notă din *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, în august 1961, apoi, într-un mod care mi se pare mai satisfăcător, în alte două Note din *Comptes*

Rendus de l'Académie des Sciences, în august 1962. Actualmente termin redactarea unei cărți în care voi expune, așa cum am făcut în ultimul meu curs la Institutul Henri Poincaré, în iarna 1961—1962, principiile acestei „termodinamici a particulei izolate"[1]. Voi remarca, dealtfel, că această termodinamică fiind aplicabilă la ansambluri de particule aflate în interacțiune, care sînt toate în contact energetic cu termostatul ascuns, denumirea de „termodinamica ascunsă a particulelor" ar fi poate preferabilă denumirii pe care, din motive evidente, am adoptat-o la început.

Dar înainte de a vă expune bazele și cîteva aplicații ale acestei foarte atrăgătoare teorii noi, trebuie în prealabil să reamintesc unele noțiuni ale termodinamicii relativiste care sînt cunoscute de multă vreme (lucrările lui Planck și ale școlii sale în jurul anului 1910), dar sînt rareori predate la cursuri la facultăți.

Reamintirea cîtorva noțiuni de termodinamică relativistă

În termodinamica relativistă se demonstrează că, dacă un corp considerat în sistemul său propriu posedă o temperatură T_0 și conține o cantitate de căldură Q_0, pentru un observator care îl vede trecînd cu o viteză βc el are o temperatură T și conține o cantitate de căldură Q care sînt date prin formulele:

$$(8) \qquad T = T_0\sqrt{1-\beta^2} \qquad Q = Q_0\sqrt{1-\beta^2}\,.$$

Se demonstrează de asemenea, și aceasta rezultă aproape imediat din formulele (8), că entropia este un invariant relativist, adică $S = S_0$.

Înainte de a merge mai departe, vom face o convenție de notație care ne va fi foarte utilă în continuare. Dacă A este o mărime a cărei valoare depinde de masa proprie M_0 a unui corp, precum și

[1] A se vedea bibliografia la sfîrșitul articolului.

de alţi parametri, cum ar fi viteza sau poziţia acestui corp, vom nota prin $[\delta A]_{M_0}$ mica variaţie pe care o suferă A atunci cînd, menţinînd pe M_0 constant, facem să varieze uşor ceilalţi parametri, şi prin $\delta_{M_0}A$ mica variaţie pe care o suferă A atunci cînd facem să varieze uşor M_0, ceilalţi parametri rămînînd constanţi. Aceasta fiind admis, să considerăm un corp în sistemul său propriu: masa proprie a sa va fi M_0 şi, conform principiului inerţiei energiei, energia sa internă va fi $W_0 = M_0c^2$. Dacă masa lui proprie suferă o uşoară variaţie δM_0, energia lui internă va varia cu $\delta W_0 = \delta M_0c^2$. Aceasta nu poate avea loc decît dacă corpul a primit sau a cedat cantitatea de energie δW_0 şi, cum energia internă este o energie înmagazinată în interiorul corpului, cantitatea $\delta_{M_0}c^2$ trebuie considerată ca o cantitate de căldură δQ_0. Deci pentru un observator care vede trecînd un corp cu viteza βc, cantitatea de căldură primită sau cedată de corp va fi

$$(9) \qquad \delta Q = \delta Q_0 \sqrt{1-\beta^2} = \delta M_0c^2 \sqrt{1-\beta^2}.$$

Or, după cum e bine cunoscut în dinamica relativistă, pentru acest observator funcţia Lagrange va fi

$$(10) \qquad \mathcal{L} = -M_0c^2\sqrt{1-\beta^2} + \ldots$$

termenii de grad superior nescrişi nedepinzînd de M_0. Avem deci

$$(11) \qquad \delta Q = -\delta_{M_0}\mathcal{L}.$$

Această formulă poate fi uşor regăsită prin alte raţionamente mai complete pe care le voi da în cartea pe care o pregătesc. Voi arăta unul din ele.

Să ne plasăm în sistemul observatorului care vede trecînd corpul cu viteza βc. El poate scrie cele două formule ale dinamicii relativiste astfel:

$$(12) \qquad W = \frac{M_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad \frac{d}{dt}\left[\frac{M_0v}{\sqrt{1-\beta^2}}\right] = f.$$

Din cea de-a doua extragem următoarea expresie a lucrului primit de corp în cursul timpului δt:

$$\delta \mathfrak{T} = fv \ \delta t = v \delta \frac{M_0 v}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{13}$$

Dacă se presupune că masa proprie este constantă, așa cum se face în mod obișnuit în dinamica relativistă, se verifică ușor că lucrul în chestiune are ca valoare

$$[\delta \mathfrak{T}]_{M_0} = [\delta W]_{M_0}, \tag{14}$$

ceea ce e normal. Dar dacă masa proprie poate varia, vom avea pentru lucrul furnizat corpului

$$\delta \mathfrak{T} = [\delta \mathfrak{T}]_{M_0} + \delta_{M_0} \mathfrak{T} = [\delta W]_{M_0} + \tag{15}$$

$$+ \frac{v^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \delta M_0.$$

Or, avem și în acest caz

$$\delta W = [\delta W]_{M_0} + \frac{c^2}{\sqrt{1+\beta^2}} \delta M_0 \tag{16}$$

și din ecuațiile (15) și (16) rezultă

$$\delta W = \delta \mathfrak{T} + \delta M_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2}. \tag{17}$$

Întrucît principiul conservării energiei dă $\delta W = \delta \mathfrak{T} + \delta Q$, în care δQ este cantitatea de căldură primită de corp, vom regăsi formulele (9) și (11).

Termodinamica particulei izolate sau termodinamica ascunsă a particulelor

Pentru a dezvolta termodinamica particulei izolate vom admite mai întîi că putem aplica unei particule izolate a scării microfizice formula

$$\delta Q = - \delta_{M_0} \mathcal{L}. \tag{11}$$

În plus, vom admite de asmenea, în acord cu vechile mele idei din 1946—1948, că particula, în contact permanent cu termostatul ascuns, poate

fi considerată ca avînd o temperatură T definită prin formula care are covarianța relativistă dorită

$$(18)\ kT = h\nu_c = h\nu_0 \sqrt{1-\beta^2} = m_0 c^2 \sqrt{1-\beta^2}.$$

Vom defini entropia raportînd-o la termostatul ascuns care este un sistem foarte complex. Inspirîndu-ne din metoda folosită în trecut de Einstein în lucrările sale asupra fluctuațiilor, vom scrie entropia S a termostatului ascuns sub forma

$$S = S_0 + S(M_0),$$

în care S_0 este partea acestei entropii care este independentă de valoarea fluctuantă a masei proprii M_0 a particulei, pe cînd $S(M_0)$ este partea mică a acestei entropii care depinde de valoarea lui M_0. Vom avea atunci

$$(19)\qquad \delta_{M_0} S = \delta S(M_0) = -\frac{\delta Q}{T} = \frac{\delta_{M_0}\mathcal{L}}{T}.$$

Semnul —, figurînd înaintea lui δQ, provine din faptul că δQ este căldura *cedată* particulei de termostatul ascuns. Folosind formulele (10) și (11), obținem

$$(20)\qquad \delta S(M_0) = -k\frac{\delta M_0}{m_0},$$

de unde, în sfîrșit,

$$(21)\qquad S = S_0 - k\frac{M_0}{m_0},$$

formula fundamentală în care invarianța numărului al doilea este bine scoasă în evidență.

E ușor de tras din această formulă o primă consecință importantă. Într-adevăr, după formula lui Boltzmann care leagă entropia de probabilitate, probabilitatea valorii M_0 a masei proprii fluctuante trebuie să fie proporțională cu $e^{\frac{S}{k}}$, adică cu $e^{-\frac{M_0}{m_0}}$. De aici se trage concluzia că va-

loarea medie a lui M_0 pentru o particulă în afara oricărui cîmp de forțe (clasic sau cuantic) este:

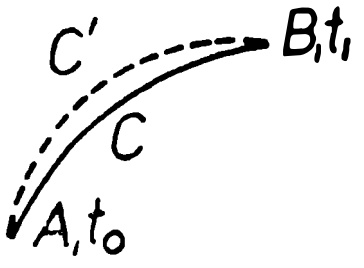
$$(22)\quad \overline{M}_0 = \frac{\int_0^\infty M_0 e^{-\frac{M_0}{m_0}} dM_0}{\int_0^\infty e^{-\frac{M_0}{m_0}} dM_0} = m_0.$$

Astfel masa proprie constantă m_0, atribuită de obicei particulei, ne apare ca valoarea medie a veritabilei mase proprii instantanee M_0 care este fluctuantă.

O altă consecință interesantă a acestei teorii este stabilirea unei legături între principiul minimei acțiuni și al doilea principiu al termodinamicii. Principiul minimei acțiuni al lui Hamilton ne spune că, dacă în mișcarea sa naturală, conformă cu legile dinamicii, particula pornește de la un punct A în momentul t_0 pentru a ajunge într-un punct B în momentul t_1 integrala de acțiune luată de-a lungul acestei mișcări este minimă în raport cu aceeași integrală luată de-a lungul oricărei mișcări „variate" care ar aduce particula de la punctul A în momentul t_0 la punctul B în momentul t_1. Sîntem deci conduși să scriem

$$(23)\quad \int_{t_0}^{t_1} [\delta\mathcal{L}]_{M_0}\, dt = 0, \qquad \int_{t_0}^{t_1} [\delta^2\mathcal{L}]_{M_0}\, dt > 0,$$

primele și secundele variații ale lui $\mathcal{L}$ fiind luate menținîndu-se masa proprie M_0 constantă și egală cu valoarea sa normală m_0.



Am introdus aici o ipoteză care mi se pare a avea o semnificație fizică foarte interesantă.

ACB fiind traiectoria naturală, am presupus că traiectoriile variate, cum ar fi $AC'B$, nu corespund, cum se presupune de obicei, unor mișcări fictive

imaginate de teoretician, ci unor mişcări care pot realmente avea loc cînd masa proprie M_0 a particulei suferă între t_0 şi t_1 o anumită suită de fluctuaţii. În acest caz traiectoria fluctuată $AC'B$ trebuie, după principiul lui Hamilton, să fie determinată de ecuaţia

$$(24)\quad \int_{t_0}^{t_1} \delta(\mathcal{L} + \delta\mathcal{L})\mathrm{d}t = \int_{t_0}^{t_1} (\delta\mathcal{L} + \delta^2\mathcal{L})\mathrm{d}t = 0.$$

Aici însă masa proprie nemaifiind presupusă constantă, trebuie să scriem

$$(25)\quad \delta\mathcal{L} = [\delta\mathcal{L}]_{M_0} + \delta_{M_0}\mathcal{L};\ \delta^2\mathcal{L} = [\delta^2\mathcal{L}]_{M_0} + \delta^2_{M_0}\mathcal{L},$$

în care $\delta^2_{M_0}\mathcal{L}$ desemnează totalitatea termenilor care, în $\delta^2\mathcal{L}$, depind de variaţia lui M_0. Avem deci pe $AC'B$

$$(26)\quad \int_{t_0}^{t_1} \{[\delta\mathcal{L}]_{M_0} + \delta_{M_0}\mathcal{L} + [\delta^2\mathcal{L}]_{M_0} + \delta^2{}_{M_0}\mathcal{L}\}\mathrm{d}t = 0.$$

Integrala primului termen este însă nulă în virtutea principiului lui Hamilton şi se poate verifica uşor că al patrulea termen este neglijabil faţă de ceilalţi. În final, ţinînd cont de (23), rămîne

$$(27)\quad -\int_{t_0}^{t_1} \delta_{M_0}\mathcal{L}\mathrm{d}t = -(t_1 - t_0)\overline{\delta_{M_0}\mathcal{L}} = \\ = \int_{t_0}^{t_1} [\delta^2\mathcal{L}]_{M_0} \times \mathrm{d}t > 0,$$

$\overline{\delta_{M_0}\mathcal{L}}$ fiind o medie temporală între t_0 şi t_1. Atunci, cum $t_1 - t_0$ este pozitiv, iar $-\delta_{M_0}\mathcal{L}$ este căldura cedată particulei de termostatul ascuns, se vede că în medie temporală această cantitate de căldură, care e nulă pe traiectoria naturală, este pozitivă pe traiectoria fluctuată. Cu alte cuvinte, entropia S scade în medie atunci cînd se trece de la ACB la $AC'B$. Entropia este deci maximă pe traiectoria naturală în raport cu fluctuaţiile supuse condiţiilor variaţiei hamiltoniene. Traiectoria naturală este deci mai probabilă decît traiectoriile fluctuate. Astfel apare o legătură foarte curioasă între prin-

cipiul minimei acțiuni și al doilea principiu al termodinamicii, atunci cînd se adoptă cadrul nostru de idei[1].

Situația unei particule în contact energetic permanent cu un termostat ascuns prezintă o anumită analogie cu aceea a unei granule, vizibilă la microscopul optic și supusă acțiunii gravitației, care se află în suspensie într-un fluid ale cărui molecule constituie un termostat ascuns. În momentul în care Jean Perrin urmărea celebrele sale experiențe pe granule de acest gen, teorii termodinamice aprofundate ale fluctuațiilor de altitudine ale granulelor în fluid au fost dezvoltate de Smoluchowsky, în special cu metoda lui Einstein, și ele sînt foarte interesant de comparat cu teoria noastră.

Tranzițiile cuantice și „prerogativa" stărilor monocromatice

De la enunțarea teoriei atomului a lui Bohr, în 1913, s-a atribuit tranzițiilor cuantice, care fac ca un sistem cuantificat să treacă de la o stare staționară la alta, un caracter ce ar putea fi calificat drept mistic. Într-adevăr, se renunță să se facă despre ele vreo imagine, iar Bohr nu a ezitat să afirme că „transcendau" orice descriere în termeni de spațiu și de timp. Ceea ce l-a determinat pe Schrödinger să spună cu ironie că în teoria cuantică actuală se descriau minuțios stările staționare în care nu se petrece nimic, dar că se refuza să se vorbească de tranzițiile cuantice în care se petrece ceva.

Ideea introdusă de teoria dublei soluții că mecanica ondulatorie, în ultimă analiză, trebuie să se bazeze pe ecuații neliniare permite să se creadă că, dacă tranzițiile cuantice scapă teoriei uzuale,

---

[1] În termeni metaforici se poate spune că traiectoria naturală urmează talvegul unei văi de negentropie. Pentru cazul în care între A și B există un „focar cinetic" în raport cu A, a se vedea *C.R. Acad. Sc.*", vol. 257, 1963, p. 1 822. Această notă e reprodusă mai departe.

aceasta se explică prin faptul că ele constituie procese esențialmente neliniare. Ele ar fi procese tranzitorii foarte scurte, analoge acelora întîlnite deja în mai multe teorii neliniare în mecanică și în fizică, atunci cînd are loc trecerea bruscă de la un ciclu limită la un altul. Această idee foarte atrăgătoare a fost deja examinată, cu cîțiva ani în urmă, de Cap și Destouches și a fost reluată de curînd de Fer, Lochak și Andrade e Silva care au publicat în legătură cu aceasta comunicări de mare interes.

Or, cînd Fer, Lochak și Andrade e Silva au luat cunoștință de prima mea notă din august 1961 asupra termodinamicii particulei izolate, după ce mi-au atras atenția cu multă dreptate că formulele mele deduse din relația $dS = \frac{dQ}{T}$ nu se aplicau decît fenomenelor reversibile, ei mi-au sugerat că stările tranzitorii foarte bruște pe care le-au examinat ar putea foarte bine să fie transformări însoțite de o bruscă creștere a entropiei și că trecerea de la o stare staționară la o alta ar putea, într-adevăr, să comporte trecerea unei văi de entropie (sau a unui munte de negentropie).

În cursul iernii 1962—1963, am fost determinat să reflectez mai profund asupra acestor sugestii interesante. Pentru a face înțeleasă orientarea gîndirii mele în această privință, voi porni de la observația că, în teoria uzuală, se acordă un fel de prerogativă stărilor ce pot fi calificate ca „monocromatice", precizînd că înțeleg prin aceasta, pe de o parte, stările staționare ale sistemelor cuantificate ce sînt asociate unei unde staționare monocromatice, reprezentată printr-o funcție proprie principiului hamiltonian, pe de altă parte, în cazul particulelor în mișcare progresivă, stările asociate unor grupuri de unde limitate, care sînt asimilabile în partea majoră a extensiunii lor unei unde plane monocromatice. Această prerogativă constă în faptul că aceste stări monocromatice sînt privite ca realizate mai normal decît stările reprezentate printr-o superpoziție de funcții proprii sau de unde

plane monocromatice. De la începuturile teoriei atomice a lui Bohr, atomul a fost considerat ca aflîndu-se totdeauna în mod necesar într-o stare staționară, iar cînd, mai tîrziu, teoria lui Bohr a fost tradusă în limbajul mecanicii ondulatorii, s-a admis că stările reprezentate prin superpoziții de funcții proprii nu aveau decît o existență foarte efemeră și că, în definitiv, atomul era totdeauna sesizat de observație într-o stare staționară reprezentată de una din funcțiile proprii. În teoria cuantică a cîmpurilor, aceeași prerogativă se manifestă prin faptul că „numerele de ocupare" sînt în general raportate la undele plane monocromatice. Într-unul din articolele foarte pătrunzătoare pe care le-a consacrat criticii concepțiilor cuantice actuale, Schrödinger s-a mirat, pe bună dreptate, de această prerogativă a stărilor monocromatice; el credea că era nejustificată, deoarece *a priori* o stare de superpoziție are un caracter mai general decît o stare monocromatică (funcția $\Psi = \sum_i c_i \Psi_i$ este mai generală decît funcția $\Psi = \Psi_i$). Și totuși succesul ipotezei că stările monocromatice au efectiv o prerogativă nu permite deloc să ne îndoim, contrar opiniei lui Schrödinger, că această prerogativă nu ar fi justificată.

Totul s-ar putea însă explica dacă s-ar admite, cum am fost condus să o fac, că stările de superpoziție, avînd o entropie mai mică și, ca urmare, o probabilitate mai slabă decît stările monocromatice, sînt oarecum instabile, iar tranziții cuantice cu caracter ireversibil (și poate chiar în anumite cazuri procese reversibile) readuc totdeauna rapid particulele sau sistemele spre stări monocromatice cu o entropie mai ridicată. În acest caz devine evident că stările de superpoziție vor fi, în general, de scurtă durată și vor tinde să se transforme în stări monocromatice de îndată ce condițiile impuse particulei sau sistemului vor permite schimburi de energie sau de cantitate de mișcare necesare pentru aceasta.

Pentru a așeza pe o bază solidă ideea pe care am expus-o mai sus, ar trebui demonstrat la modul general, pornind de la termodinamica ascunsă a particulelor, că entropia stărilor de superpoziție este inferioară aceleia a stărilor monocromatice. Nu posed la ora actuală o demonstrație generală a acestui fapt, dar am găsit demonstrații într-un anumit număr de cazuri particulare. Pentru a nu lungi prea mult această expunere, nu voi da aici aceste demonstrații și mă voi mulțumi să arăt principiul lor.

Scriu mai întîi, din nou, definițiile (5) și (21) ale potențialului cuantic și entropiei:

$$Q = M_0c^2 - m_0c^2, \qquad S = S_0 - k\frac{M_0}{m_0}$$

care ne determină să scriem

$$S = S_0 - k - k\frac{Q}{c^2} \tag{28}$$

Or, în cazurile pe care le-am putut studia, potențialul cuantic Q este nul în stările monocromatice astfel încît aceste stări au entropia „standard" $S = S_0 - k$. În stările de superpoziție, Q este diferit de zero și se poate demonstra ușor că $\bar{Q} = \int Qa^2d\tau$ este pozitiv. Entropia unei stări de superpoziție va avea deci, după (28), ca valoare medie

$$\bar{S} = S_0 - k - k\frac{\bar{Q}}{c^2} < S_0 - k. \tag{29}$$

De aici rezultă că, în cazurile pe care le-am putut studia, entropia stărilor de superpoziție este, în medie, inferioară aceleia a stărilor monocromatice.

Este interesant de remarcat că instabilitatea stărilor de superpoziție pare astfel a fi legată de apariția în aceste stări a unui potențial cuantic pozitiv care atrage după sine o creștere a masei proprii M_0 a particulei sau a sistemului, iar de aici, conform formulei fundamentale (21), o diminuare

a entropiei. Aceasta pare să demonstreze legătura strînsă care există între termodinamica noastră ascunsă și noile noțiuni care au fost introduse de teoria ghidării și de teoria dublei soluții[1].

Concluzie

Am prezentat o viziune de ansamblu a evoluției gîndirii mele începînd din momentul cînd, reluînd ideile mele inițiale asupra adevăratei semnificații fizice a mecanicii ondulatorii, am căutat să-i dau o reinterpretare ale cărei puncte esențiale sînt, după mine, că ea restabilește imaginea clară a particulei ca un obiect foarte mic, permanent localizat în spațiu în cursul timpului și că ea redă undei caracterul unui cîmp avînd existență obiectivă, care se propagă în spațiu în cursul timpului. Am ajuns astfel, în cadrul teoriei dublei soluții, să reiau „formula ghidării", care atribuie particulei o mișcare bine determinată, analogă aceleia pe care hidrodinamica clasică o atribuie moleculei unui fluid, moleculă a cărei mișcare se operează în fiecare clipă urmînd una din liniile de curent ale curgerii hidrodinamice.

Obțineam astfel o imagine clară, dar, am recunoscut-o apoi, fără îndoială prea rigidă. Mi-am dat seama atunci de necesitatea de a suprapune mișcării uniforme medii a particulei definite de formula ghidării un fel de agitație termică aleatorie, dealtfel așa cum se suprapune în mișcarea reală a moleculei unui fluid mișcării uniforme definite de liniile de curent o agitație termică aleatorie. În ce privește molecula unui fluid, această agitație termică este datorată ciocnirilor sale cu celelalte molecule ale fluidului, dar pentru o particulă izolată la scara microfizică o asemenea agitație nu poate fi deloc atribuită decît contactului ei energetic cu un fel

[1] Asupra definiției energiei libere în termodinamica ascunsă a particulelor, a se vedea Louis de Broglie, *C.R. Acad. Sc.*, vol. 257, 1963, p. 1 430.

de termostat ascuns care e firesc să fie identificat cu mediul subcuantic al lui Bohm și Vigier.

Dealtfel, dacă reflectăm mai bine, pare foarte natural ca interpretarea probabilistă actuală a mecanicii ondulatorii, denumită adeseori mecanică cuantică, să conducă în cele din urmă la introducerea unor noțiuni termodinamice noi, deoarece ea introduce probabilitățile în comportamentul unei particule microfizice, chiar în aparență izolată, și ca legătura strînsă ce există între termodinamica statistică și apariția probabilităților în teoriile fizice să sugereze aproape în mod necesar existența unei termodinamici ascunse în spatele acestui comportament. Einstein a simțit aceasta de multă vreme și credea că intervenția probabilităților în mecanica ondulatorie trebuia să ducă la atribuirea unui fel de mișcare browniană particulelor microfizice. Or, cine spune mișcare browniană spune și fluctuații și termodinamică.

BIBLIOGRAFIE

Louis de Broglie :

Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la Mécanique ondulatoire: la théorie de la double solution, Gauthier-Villars, Paris, 1956.

La théorie de la Mesure en Mécanique ondulatoire, Gauthier-Villars, Paris, 1957.

L'interprétation de la Mécanique ondulatoire (*J.Phys. Rad.*, vol. 20, 1959, p. 963).

Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique ondulatoire, Gauthier-Villars, Paris, 1963.

La Thermodynamique de la particule isolée (C. R. Acad. Sc., vol. 253, 1961, p. 1 078; vol. 255, 1962, p. 807 și 1 052).

La Thermodynamique de la particule isolée (Thermodynamique cachée des particules), Gauthier-Villars, Paris, 1964.

D. Bohm și **J.-P. Vigier**, *Model of the causal interpretation of quantum theory in terms of a fluid with irregular fluctuations (Phys. Rev.*, vol. 96, 1954, p. 208).

F. Fer, J. Andrade e Silva, Ph. Leruste și **G. Lochak,** *C.R. Acad. Sc.*, vol. 251, 1960, p. 2305, 2482 și 2662; *Cahiers de Physique*, nr. 129, 1961, p. 210; nr. 137, 1962, p. 1.

J. Andrade e Silva și **G. Lochak,** *C.R. Acad. Sc.*, vol. 254, 1962, p. 4260.

G. Lochak. *C.R. Acad. Sc.*, vol. 254, 1962, p. 4436; vol. 256, 1963, p. 3601.

COMPTES RENDUS
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES
Grupa 4
(Paris, vol. 257, p. 1822—1824, 16 septembrie 1963)

Mecanica ondulatorie. — *Despre teoria focarelor cinetice în termodinamica particulei izolate.* Nota d-lui Louis de Broglie

Reamintind modul în care a legat principiul minimei acțiuni al lui Hamilton de maximul entropiei în a sa termodinamică a particulei izolate, autorul arată cum se prezintă în acest cadru de idei chestiunea focarelor cinetice.

Vom reaminti mai întîi relația pe care am stabilit-o într-o Notă anterioară[1] între principiul minimei acțiuni al lui Hamilton și al doilea principiu al termodinamicii.

Vom începe prin a reaminti o definiție. Dacă A este o cantitate care depinde de masa proprie variabilă M_0 a unei particule și de alte variabile, desemnăm cu $\delta_{M_0}A$ variația suferită de A cînd M_0 variază, celelalte variabile rămînînd fixe, și cu $[\delta A]_{M_0}$ variația suferită de A cînd celelalte variabile variază, M_0 rămînînd fix.

Să considerăm mișcarea „naturală" a unei particule care o aduce dintr-un punct A la momentul t_0, într-un punct B la momentul t_1 și să examinăm variația hamiltoniană uzuală care menține fixe punctele A și B, precum și momentele t_0 și t_1. Cu

[1] *Comptes Rendus*, vol. 255, 1962, p. 1 052.

termodinamica noastră despre particula izolată, am obținut următoarea formulă:

$$(1) \qquad -\int_{t_0}^{t_1} \delta_{M_0} \mathcal{L}\, dt = \int_{t_0}^{t_1} [\delta^2 \mathcal{L}]_{M_0} dt,$$

din care, luînd valorile medii în intervalul de timp $t_1 - t_0$ și adoptînd definiția noastră despre entropia S a termostatului ascuns, aflăm

$$(2) \qquad \delta \bar{S} = -\overline{[\delta^2 \mathcal{L}]}_{M_0} < 0,$$

deoarece acțiunea hamiltoniană este minimă pentru mișcarea naturală. Am legat astfel faptul că integrala de acțiune hamiltoniană $\int_{t_0}^{t_1} \mathcal{L} dt$ este minimă pentru mișcarea naturală la un maxim al entropiei medii pentru această mișcare.

În termeni metaforici, acest rezultat poate fi exprimat spunînd că mișcarea naturală se efectuează urmînd linia de talveg a unei văi de negentropie. Vedem atunci că orice traiectorie variată trebuie să se cațere deasupra fundului văii, ceea ce dă o imagine intuitivă interesantă a creșterii negentropiei medii, deci a diminuării entropiei medii, atunci cînd se trece de la mișcarea naturală la una oarecare dintre mișcările variate.

Se știe însă că acțiunea nu este totdeauna minimă pentru orice poziție dată a punctelor A și B pe traiectoria naturală. Analiza acestei chestiuni conduce la introducerea noțiunii de „focar cinetic". Problema este în general studiată în cazul principiului lui Maupertuis, dar ea se transpune ușor în cazul acțiunii hamiltoniene.

Să presupunem că există două mișcări naturale 1 și 2, foarte apropiate, care aduc particula dintr-un punct A la momentul t_0 într-un punct C la momentul t_2. Să notăm cu δ_{12} și δ_{21} variațiile ce corespund trecerii de la mișcarea 1 la mișcarea 2 și invers: avem, evident, $\delta_{21} = -\delta_{12}$. Să aplicăm principiul

lui Hamilton la mișcările 1 și 2 considerînd pe fiecare din ele ca fiind o mișcare variată în raport cu cealaltă. Trebuie să avem

$$(3) \qquad \int_{t_0}^{t_2} [\delta^2_{12}\mathcal{L}]_{M_0}\, dt \geqslant 0, \qquad \int_{t_0}^{t_2} [\delta^2_{21}\, \mathcal{L}]_{M_0}\, dt \geqslant 0$$

ceea ce nu e posibil decît dacă

$$(4) \qquad \int_{t_0}^{t_2} [\delta^2\mathcal{L}]_{M_0}\, dt = 0.$$

Traiectoria 2 este deci caracterizată prin faptul că a doua variație a acțiunii hamiltoniene, cînd se trece de la 1 la 2 (sau invers), este nulă. Dar atunci relația (1) ne dă

$$(5) \qquad \delta_{12}\, \bar{S} = \delta_{21}\, \bar{S} = 0$$

Entropia medie rămîne deci aceeași atunci cînd se trece de la mișcarea 1 la mișcarea 2 sau invers.

Aceasta fiind admis, este bine cunoscut că, dacă se efectuează variația hamiltoniană între un punct A și un punct B situat între A și C ($t_2 > t_1 > t_0$), acțiunea este minimă pentru intervalul de timp $t_1 - t_0$. Dacă însă, dimpotrivă, punctul B este situat pe traiectoria 1 dincolo de punctul C ($t_1 > t_2 > t_0$), nu mai există un minim al acțiunii pentru intervalul de timp $t_1 - t_0$.

Să interpretăm aceasta din punctul nostru de vedere termodinamic. Cele două traiectorii 1 și 2 urmează liniile de talveg a două văi de negentropie foarte apropiate, de aceeași adîncime medie (fiindcă $\delta_{12}\bar{S} = 0$), care sînt separate una de cealaltă printr-o colină de negentropie, dar care se întîlnesc în C. Dacă B se află pe traiectoria 1 între A și C, orice traiectorie variată va trebui să se cațere pe flancul colinelor de negentropie care mărginesc traiectoria 1: vom avea deci $\delta\bar{S} < 0$ sau $[\overline{\delta^2\mathcal{L}}]_{M_0} > 0$, adică pentru A 1 B va exista un minim al acțiunii hamiltoniene. Dacă, dimpotrivă, punctul B se află pe traiectoria 1 dincolo de punctul C, se va putea lua A 2 C 1 B ca traiectorie variată și cum această

traiectorie variată rămîne pe fundul unei văi de negentropie de acelaşi nivel mediu ca şi valea $A\ 1\ C\ 1\ B$, avem pentru această variaţie $\delta\bar{S} = 0$ sau $\overline{[\delta^2\mathcal{L}]}_{M_0} = 0$ şi acţiunea hamiltoniană nu este minimă pentru orice variaţie posibilă.

Reiese astfel că aspectul termodinamic pe care l-am introdus în studiul principiului minimei acţiuni al lui Hamilton este susceptibil să furnizeze o interpretare intuitivă simplă a rolului jucat de focarele cinetice.

Note şi discursuri

NOTĂ DESPRE VIAȚA ȘI OPERA LUI GEORGES DARMOIS

Citită în ședința anuală a Academiei de Științe din 9 decembrie 1961

Domnilor,

Se întîmplă, destul de frecvent din nefericire, ca unii membri ai confreriei noastre să facă parte din ea doar puțini ani. A trecut timpul cînd se intra în academii la tinerețe, așa cum a intrat odinioară într-a noastră d'Alembert, la vîrsta de 24 de ani, și, cu toată prelungirea duratei medii de viață, prea numeroși sînt acela dintre confrații noștri pe care îi păstrăm printre noi doar cîțiva ani. Așa a fost recent cazul lui Georges Darmois care, ales membru al Academiei de Științe în noiembrie 1955, pe cînd părea încă în plină vigoare intelectuală și fizică, ne-a fost răpit prematur în primele zile ale anului 1960. Importanța contribuțiilor pe care le-a adus unor ramuri foarte variate ale științelor matematice și fizice, amploarea vastei sale culturi, ponderația judecății sale, extrema delicatețe a caracterului său au făcut ca pierderea sa să ne fie tuturora deosebit de dureroasă. Este deci cu totul firesc să consacrăm astăzi cîteva momente pentru a evoca amintirea unei atît de eminente și simpatice figuri de savant.

Georges Darmois s-a născut la 24 iunie 1888 la Eply, un mic sat din departamentul Meurthe-et-Moselle, situat la jumătatea drumului dintre Nancy și Pont-à-Mousson. Aparținea unei foarte vechi familii lorene de cultivatori și de mici mește-

şugari: încă din secolul al XVI-lea existau la Eply cultivatori din familia Darmois.

Georges Darmois avea un frate şi o soră. Fratele său Eugène, cu patru ani mai mare, avea să facă şi el o frumoasă carieră ştiinţifică şi, ca fizician cu renume, să devină profesor la Sorbona, apoi membru al Academiei noastre. A făcut parte din ea, secţia de fizică, timp de şapte ani, din 1951 pînă în 1958, şi a murit numai cu doi ani înaintea fratelui său, cu care de trei ani se întîlnise în rîndurile confreriei noastre. Amîndoi fraţii se aflau deci, unul alături de celălalt, printre noi: se ştie că această împrejurare nu s-a produs decît de puţine ori în decursul celor trei secole de existenţă a Academiei noastre. Eugène şi Georges Darmois aveau o soră care şi ea, printr-un efort personal, îşi însuşise o vastă cultură. Foarte ataşată de fraţii săi, a locuit la Paris cu fratele ei Georges, încă celibatar şi pe atunci preparator agregat la Şcoala normală, în decursul anilor care au precedat războiul din 1914. S-a căsătorit apoi cu un ofiţer, prieten al fraţilor săi. A fost ucisă în 1942 la Rouen, în cursul unui bombardament.

Copiii Darmois au fost crescuţi la Eply de părinţii şi bunicul lor. Georges Darmois păstrase o vie amintire a anilor săi de copilărie cînd muncea acasă şi lua parte la culesul viei. Inteligenţi şi curajoşi, părinţii lui Georges Darmois, văzînd că cei doi fii ai lor sînt dornici să se instruiască, au acceptat mari sacrificii spre a le permite să-şi continue studiile la colegiul din Toul, apoi la liceul din Nancy. Au avut bucuria de a-i vedea reuşind în eforturile lor şi intrînd succesiv amîndoi la Şcoala normală superioară. Dealtfel, ei n-au putut asista decît la debutul strălucitelor lor cariere universitare, căci tatăl a murit în 1913, iar soţia sa cu doi ani mai tîrziu.

Evenimentele şi împrejurările vieţii sale aveau să-l îndepărteze pe Georges Darmois de satul natal, care dealtfel a fost greu încercat în două rînduri. Complet distrus în timpul războiului din 1914, el nu s-a ridicat din ruine decît pentru a fi din nou

greu lovit în 1939. Georges Darmois a păstrat întotdeauna cultul colţişorului de pămînt loren unde şi-a petrecut „tinereţea fericită", precum el însuşi a spus în discursul pe care l-a pronunţat cu ocazia primirii însemnelor de academician. Îi rămăseseră acolo numeroase rude, printre care un unchi şi o vară, fiică a acestui unchi, care au exercitat succesiv, timp de ani îndelungaţi, funcţia de primar în Eply.

*

* *

Dacă aruncăm o privire asupra întregii opere ştiinţifice a lui Georges Darmois, observăm că ea se împarte în trei perioade succesive: în prima perioadă a studiat probleme de geometrie şi de analiză; în a doua s-a preocupat în principal de fizica matematică; în sfîrşit, în a treia perioadă, s-a consacrat aproape exclusiv calculului probabilităţilor şi în special aplicaţiilor acestuia la statistică, în diferite domenii. Această diviziune a operei confratelui nostru se leagă strîns de circumstanţele vieţii sale şi de etapele carierei sale. Aşa încît mai întîi trebuie să-l urmărim în cursul unei existenţe căreia marile evenimente ale secolului nostru i-au dat uneori o turnură neprevăzută.

Intrat în Şcoala normală superioară în 1906, la vîrsta de 18 ani, Georges Darmois iese de aici agregat în matematici în 1909, apoi îşi satisface serviciul militar normal la Toul din 1909 pînă în 1911. Revine apoi la Şcoala normală ca preparator agregat din 1911 pînă în 1914. Atunci începe primele sale lucrări personale şi, în mod cu totul firesc, sub influenţa unui profesor ca Gaston Darboux, le orientează spre geometrie şi atacă probleme dificile despre care vom vorbi îndată: le rezolvă cu o mare îndemînare şi astfel ajunge să se ocupe de teoria ecuaţiilor cu derivate parţiale, ceea ce îl va antrena mai tîrziu spre fizica matematică.

Darmois era absorbit de pregătirea tezei sale de doctorat, cînd a izbucnit războiul din 1914.

Acest mare eveniment, care a zdruncinat viața atîtor oameni din generația sa, chiar atunci cînd i-au supraviețuit, avea să-i impună preocupări cu totul noi și să schimbe orientarea cercetărilor sale.

Mobilizat la Toul, e nevoit ca, începînd de la sfîrșitul anului 1914, să se ocupe de probleme de balistică, avînd ca obiect apărarea orașului Toul împotriva atacurilor avioanelor inamice care zburau la joasă altitudine: trebuia reglat tirul mitralierelor trăgînd aproape vertical asupra acestor avioane. Nevoit astfel să se preocupe de probleme foarte concrete, Georges Darmois se adaptează cu ușurință la ele și în aprilie 1916 este detașat într-o secție de reperare prin sunet, secție al cărei șef era fostul său coleg la Școala normală, confratele nostru Gustave Ribaud. Această secție de reperare utiliza metodele elaborate de regretații noștri confrați Aimé Cotton și Pierre Weiss și a lucrat succesiv în Alsacia, Champagne și din nou în Alsacia. În această secție Darmois continuă să fie confruntat cu importante probleme de balistică: propagarea undelor, calitatea măsurătorilor, rapiditatea de exploatare: studiază în mod special propagarea sunetului în aer agitat, frumoasă problemă de miraj sonor, din care scoate importante instrucțiuni pentru secțiile de reperare. Dar în calea sa mai întîlnește și o interesantă problemă de fizică ce îl orientează pentru prima oară spre studiile de fizică matematică. În sistemul de reperare Cotton-Weiss, măsurarea timpului se făcea cu ajutorul unui fluxmetru Grassot. Pentru a permite o etalonare rațională a acestui aparat, era necesar un studiu aprofundat al funcționării lui. În colaborare cu Ribaud, Georges Darmois a executat acest studiu care a atras atenția lui Aimé Cotton și a fost publicat mai tîrziu în *Annales de Physique*.

Toți acești ani, consacrați unor probleme foarte concrete în condiții dificile și prelungite după armistițiu prin studii experimentale efectuate pe cîmpurile de tir, au exercitat o influență profundă asupra spiritului lui Georges Darmois. Ele l-au

orientat spre fizica matematică și, mai tîrziu, spre statistică, obligîndu-l să rămînă mereu în contact cu realitatea. De atunci, el nu pregeta să repete elevilor săi că trebuie să rămînem „cu picioarele pe pămînt".

Demobilizat în iulie 1919, Darmois este detașat la Facultatea de Științe din Nancy, dar, cum nu este încă doctor, este numit doar lector la cursul de analiză superioară. Își reia lucrările de geometrie întrerupte un timp atît de îndelungat, finisează teza sa de doctorat și o susține în 1921. I se acordă imediat titlul de profesor titular de analiză superioară la facultatea din Nancy, post pe care îl va păstra pînă în 1933, predînd totodată analiza la Școala de mine din același oraș.

Iată-l deci pe Georges Darmois, de curînd căsătorit, instalat la Nancy și puternic orientat către aplicațiile matematicilor; își îndreaptă de pe atunci cursurile pe care le ține spre fizica matematică și spre calculul probabilităților și aplicațiile lui, predînd în același timp un curs de geometrie diferențială pentru candidații la gradul de agregat. Atenția sa se concentrează din ce în ce mai mult asupra fizicii matematice; în mediul științific foarte activ din Nancy, găsește o atmosferă favorabilă dezvoltării acestei a doua faze a activității sale de cercetări personale. Are, îndeosebi, numeroase și fructuoase schimburi de vederi cu colegul și prietenul său, François Croze, cu privire la teoria relativității și la principiul lui Huygens și publică, împreună cu el, o lucrare asupra acestui din urmă subiect. Se preocupă în mod special de teoria relativității generale, urmează cursurile și seminariile lui Paul Langevin la Collège de France și aplică la soluționarea dificilelor probleme matematice pe care această teorie le pune cunoștințele sale aprofundate de analiză, rutina căpătată în manipularea ecuațiilor cu derivate parțiale și resursele unui spirit deosebit de pătrunzător. Aceasta este perioada în care a îndeplinit, în cîțiva ani, a doua parte a operei sale, cea care este, fără îndoială,

cea mai profundă și mai importantă din punct de vedere pur științific.

Dar chiar în cursul acestei perioade foarte fecunde din activitatea sa, care coincide cu șederea lui la Nancy, din 1921 pînă în 1933, se schițează o nouă orientare a preocupărilor sale, care anunță cea de-a treia parte a operei sale. Începînd din 1923, Darmois introdusese în cursul său, la Nancy, elementele calculului probabilităților și ale aplicațiilor lui statistice. Or, cam în aceeași epocă, se organizase la Paris Institutul de Statistică în care Émile Borel, care fusese unul dintre fondatorii și animatorii acestuia, preluase cursul de statistică generală. Émile Borel însă, absorbit foarte curînd de ocupații de ordin politic, fusese nevoit să renunțe la a mai asigura el însuși ținerea acestui curs. În 1925, Georges Darmois îi succede, venind în fiecare săptămînă de la Nancy la Paris spre a preda cursul la Institutul de Statistică. În 1928—1929, la cererea Institutului Henri Poincaré, el acceptă să țină acolo un curs compus din 16 lecții despre statistica și dinamica stelară. Astfel, puțin cîte puțin, fără a abandona complet cercetările sale de fizică matematică, el se preocupă din ce în ce mai mult de dezvoltarea metodelor statistice și de aplicațiile lor în domenii foarte diverse.

Această nouă schimbare de orientare se accentuează și mai mult în 1933, atunci cînd este numit lector la Facultatea de Științe din Paris unde, la început, îi suplinește pe Paul Painlevé și Ernest Vessiot. Numit definitiv la Sorbona, el devine profesor fără catedră în 1936 și, cîțiva ani mai tîrziu, profesor titular. De atunci, Darmois se consacră aproape exclusiv predării metodelor statistice și difuzării lor în cercuri din ce în ce mai largi. Cu grija permanentă de a continua problemele de fizică matematică care îl interesau, stimulînd cercetările efectuate în acest domeniu de elevii săi, el nu le mai rezervă decît în mod excepțional cîteva lucrări personale.

Se părea că își găsise astfel în învățămînt și în cercetare calea pe care era menit s-o urmeze de-a

lungul întregii sale cariere universitare. Dar secolul nostru, fecund în peripeții dramatice, îi rezerva din nou tribulații neprevăzute. Izbucnește războiul din 1939: ofițer de rezervă, Georges Darmois este mobilizat în serviciul de reperare prin sunet. Avea să rămînă mobilizat timp de patru ani: remarca mai tîrziu că, întrucît făcuse doi ani de serviciu militar normal și fusese mobilizat 5 ani în timpul războiului din 1914, petrecuse în total unsprezece ani în uniformă militară. Trimis de Ministerul Armamentului în Anglia ca membru al unei misiuni științifice franco-britanice, el nu se poate înapoia în Franța din cauza tragicelor evenimente din iunie 1940 și trebuie să rămînă la Londra. În februarie 1943, tot mobilizat, se află la Alger, afectat unui laborator de cercetări militare. Demobilizat în iunie 1943, tot la Alger, este însărcinat cu organizarea examenelor în toate marile școli din Algeria. A îndeplinit cu devotament aceste funcții, care i-au plăcut mult, dar acesta era un episod destul de neașteptat în cariera sa universitară.

Reîntors în Franța la sfîrșitul lui octombrie 1944, el reia la Paris activitățile științifice și universitare pe care le părăsise cu cinci ani în urmă. De aici înainte cariera sa va continua fără noi incidente. În 1949, la pensionarea confratelui nostru Maurice Fréchet, îi va urma la catedra de fizică matematică și de calculul probabilităților, post pe care avea să-l păstreze pînă la pensionarea sa, adică aproape pînă la moartea sa.

Rezervîndu-ne să revenim mai departe asupra sfîrșitului carierei lui Georges Darmois, vrem acum să analizăm pe scurt ansamblul operei sale științifice.

*

* *

Opera științifică a lui Georges Darmois se împarte, așa cum am văzut, în trei părți, destul de net separate în timp: geometrie și analiză, fizică matematică, calculul probabilităților și statistică.

Chiar pe cînd era elev al Şcolii normale Darmois făcuse un interesant studiu asupra transformărilor punctuale, astfel încît normalele la punctele corespunzînd la două suprafeţe să fie concurente şi, încă în 1910, Jules Tannery prezentase Academiei noastre o notă asupra acestui subiect, redactată de acest tînăr care nu avea decît 22 de ani. O înclinaţie pronunţată îl îndrepta atunci spre geometrie şi era puternic influenţat de acel mare geometru analist care a fost Gaston Darboux. Revenit la Şcoala normală în 1911 după satisfacerea serviciului militar, îşi propune studierea ecuaţiilor cu derivate parţiale, generate de problemele de geometrie. Se ocupă în mod cu totul special de curbele cu torsiune constantă, problemă care se reduce la o ecuaţie a lui Monge; domină acest subiect dificil foarte repede şi publică rezultate foarte interesante obţinute cu metode foarte elegante. La începutul lui 1914 întreprinde redactarea ansamblului cercetărilor sale asupra curbelor cu torsiune constantă şi speră să-şi poată susţine curînd teza de doctorat. Războiul din 1914 l-a antrenat spre alte studii şi l-a orientat către probleme mai concrete. Abia în 1920, stabilit la Nancy, a putut să termine redactarea definitivă a tezei sale şi să vină să o susţină la Facultatea de Ştiinţe din Paris la 26 februarie 1921.

Dar, aşa cum am spus, atenţia sa se îndrepta atunci din ce în ce mai mult spre probleme de fizică matematică şi din acel moment nu va mai reveni la studiile de geometrie şi de analiză pe care le desfăşurase cu strălucire în timpul primei sale tinereţi. Se cuvine totuşi să remarcăm că aceste prime studii îi dăduseră o cunoaştere foarte amănunţită a proprietăţilor ecuaţiilor cu derivate parţiale şi o mare îndemînare în manipularea lor, pregătindu-l astfel la desăvîrşirea importantei opere pe care avea s-o realizeze în domeniul fizicii matematice.

Prima sa lucrare în acest domeniu nou pentru el fusese studiul teoretic aprofundat, pe care l-a întreprins în timpul războiului din 1914 împreună cu prietenul său Gustave Ribaud, al funcţionării

fluxmetrului Grassot, aparat care avea un rol important în executarea măsurătorilor de reperare prin sunet în metoda Cotton-Weiss. A reieșit că teoria elementară a acestui fluxmetru nu era suficientă și că trebuia să se țină seama de frecările introduse de pivoți și de prezența aerului ambiant, precum și de cupluri datorate greutății și torsiunii firelor de pătrundere a curentului. Studiul aprofundat efectuat de Ribaud și Darmois a adus mari servicii în perfecționarea măsurătorilor de reperare prin sunet. El n-a putut fi publicat decît destul de tîrziu după sfîrșitul războiului, în 1924, în *Annales de Physique*.

Căpătînd astfel exercițiu pentru lucrările de fizică teoretică, Georges Darmois va aborda, începînd din 1921, sub influența prietenului său Croze și adeseori în colaborare cu el, studiul a două probleme capitale: o critică riguroasă a enunțurilor principiului lui Huygens și un examen aprofundat al bazelor și al verificărilor teoriei relativității generale.

Să începem cu problema principiului lui Huygens. Croze și Darmois reflectaseră mult împreună asupra dificultăților pe care le ridică o enunțare riguroasă a acestui principiu, prezentat adeseori într-un mod puțin clar sau incorect și al cărui enunț obișnuit nu se poate aplica exact propagării undelor transversale. Ei observaseră că numeroși autori comiseseră în această chestiune confuzii care duceau la consecințe paradoxale, dar ajunseseră la concluzia că principiul lui Huygens era în întregime justificat și se putea exprima exact introducînd surse univoc determinate. În 1927 au publicat împreună un important articol referitor la acest subiect. Au continuat apoi studiul enormei cantități de lucrări publicate cu privire la această problemă, dar abia în 1949, într-o notă publicată în *Comptes Rendus*, sub dubla semnătură a lui François Croze și a lui Georges Darmois, au formulat un fel de concluzie definitivă la reflecțiile lor. În acea vreme, chestiunea aplicării principiului

lui Huygens la undele transversale și în special la undele electromagnetice căpătase o importanță practică considerabilă în urma dezvoltării folosirii hiperfrecvențelor în transmisiunile radioelectrice. Într-adevăr, numai principiul lui Huygens corect aplicat permite să se prevadă structura unei unde hertziene de foarte înaltă frecvență care, după ce s-a deplasat într-un ghid de unde, scapă din pîlnia așezată la extremitatea lui. Unii fizicieni preocupați de problema hiperfrecvențelor — printre care și autorul acestei note — au ajuns să examineze diverse formule care exprimau principiul lui Huygens. Făcînd sinteza acestor noi lucrări și a propriilor lor cercetări anterioare, Croze și Darmois precizează, în nota lor din 1949, condițiile pe care trebuie să le îndeplinească orice expresie exactă a principiului lui Huygens, ceea ce le permite să înlăture ca inadecvate o întreagă serie de formule propuse și să arate că toate formulele corecte sînt echivalente. Acest rezultat a fost o strălucită încununare a unei serii lungi de eforturi într-un domeniu dificil.

Cu toată înalta valoare a cercetărilor lui Darmois asupra principiului lui Huygens, opera sa esențială în domeniul fizicii matematice o constituie remarcabilele sale lucrări referitoare la teoria relativității generale. În anii care au urmat după sfîrșitul războiului din 1914, teoria relativității, în special sub forma ei generală pe care i-a dat-o Einstein, atrăgea atenția tuturor tinerilor cercetători, iar Paul Langevin devenise, în Franța, în admirabilele sale expuneri, un apostol fervent al ei. Structura matematică a acestei teorii rămînea însă insuficient precizată. Georges Darmois, care, prin lucrările sale anterioare, dobîndise o cunoaștere aprofundată a proprietăților ecuațiilor cu derivate parțiale, își propune să examineze într-un mod mai riguros decît se făcuse pînă atunci ecuațiile ce stau la baza teoriei lui Einstein și consecințele ce decurg din ele. Întrucît reflectase mult asupra propagării undelor, propagare al cărei aspect matematic fusese bine definit în opera magistrală a

confratelui nostru Jacques Hadamard, el sesizează clar importanța propagării undelor în teoria relativității generale, importanță deja semnalată de Ernest Vessiot. Reluînd în mod sistematic introducerea în relativitatea generală a concepțiilor lui Hadamard și Vessiot, el definește în multiplicitatea cvadridimensională spațiu-timp suprafețele caracteristice pe care undele de potențial gravific pot prezenta discontinuități și curbele bicaracteristice care sînt geodezice de lungime nulă. El a putut demonstra existența unor soluții ale ecuațiilor lui Einstein atunci cînd se formulează ipoteza că aceste soluții sînt analitice. Dar el însuși a semnalat că această ipoteză este fără îndoială prea restrictivă și puțin conformă caracterului însuși al relativității generale.

După ce precizase bine toate aceste puncte și dăduse astfel teoriei lui Einstein o bază matematică solidă, a studiat modul în care puteau fi utilizate diferite feluri de coordonate particulare care permit obținerea unor forme simple și ușor maniabile ale ecuațiilor de unde pe care le satisfac potențialele lui Einstein. Astfel el a ajuns să studieze semnificația coordonatelor zise „izoterme" și să dea cel dintîi o justificare riguroasă a utilizării lor. Încă din 1921, De Donder introdusese coordonatele izoterme și arătase că ele, în cazul cvasigalileian, se confundă cu acelea pe care le introdusese Einstein; ele au fost apoi utilizate cu succes de Lanczos, dar mai rămîneau unele îndoieli cu privire la legitimitatea folosirii lor. Darmois definește coordonatele izoterme plecînd de la însăși ecuația de propagare a undelor în spațiul-timp curb și arată că tocmai prin faptul că sînt legate de ecuația de propagare, ele simplifică studierea acesteia. Coordonatele izoterme, de cînd Georges Darmois le-a precizat foarte clar sensul, sînt întrebuințate fără ezitare de către toți specialiștii relativității generale și a extinderilor ei. Regretatul nostru confrate Jean Chazy a făcut cu coordonatele izoterme aplicații întinse în volumul II al cărții sale *La Théorie de la Relativité et la Mécanique céleste*

și tot astfel, făcînd uz de ele, a putut d-na Bruhat să demonstreze teorema generală a existenței și a unicității soluțiilor ecuațiilor lui Einstein. Ele au permis de asemenea d-nei Hennequin să studieze prin aproximații succesive problema a *n* mase gravitante.

O altă chestiune capitală care se pune în teoria relativității, și în legătură cu care Darmois a introdus importante idei noi, este aceea a mișcării particulelor într-un cîmp gravitațional. Se știe că această mișcare trebuie să se efectueze în așa fel încît linia de univers a particulei să fie o geodezică a cîmpului exterior. Confratele nostru, care studiase cu multă precizie modul în care se face racordarea cîmpului interior al tubului de univers al particulei cu cîmpul exterior, observase că continuitatea necesară unui anumit „vector de racordare" cere ca pereții tubului de univers să fie formați de geodezice ale cîmpului exterior. Astfel, celebrul „postulat al geodezicelor" încetează de a fi un postulat: el devine o consecință a ecuațiilor cîmpului și a unor anumite condiții necesare de continuitate. În 1926, Georges Darmois a făcut la Universitatea liberă din Bruxelles o foarte frumoasă expunere asupra ansamblului cercetărilor sale personale în domeniul relativității generale; ulterior și-a redactat expunerea, care a apărut în 1927 în colecția Memorialului științelor matematice sub titlul *Les Equations de la gravitation einsteinienne.* În acest foarte interesant fascicul, în care sînt prezentate sub o formă condensată importantele idei noi pe care le dezvoltase de cîțiva ani, el a evidențiat foarte bine importanța interpretării sale asupra mișcării particulelor. „Concepția pe care Einstein o propune a fi substituită aceleia a lui Newton, scrie el, în loc de a lega masele între ele prin forțe, le leagă prin comunitatea cîmpului în care sînt integrate ambele. Tuburile de univers care descriu mișcarea maselor materiale se scaldă — dacă se poate spune așa — în același cîmp și acest cîmp este cel care creează interdependența lor"; mai departe el adaugă: „În fond, pentru a

angrena propriul său cîmp pe cîmpul exterior, o masă mică trebuie să descrie o geodezică".

Totodată Darmois a făcut profunde observații, precizate după aceea de André Lichnérowicz, asupra modului în care se poate căuta să se prelungească cîmpul exterior spre interiorul tubului de univers pentru a obține masa particulei care produce cîmpul. El a pus în evidență faptul că acest cîmp exterior prelungit trebuie să conțină o singularitate și adăuga cu multă profunzime: „Acest rol fundamental al singularităților, care prefigurează într-un fel tuburile masice, este de o extremă importanță".

Bineînțeles, Einstein însuși ajunsese la concepții analoge celor ale lui Georges Darmois. În 1927, ilustrul savant publica împreună cu colaboratorul său Grommer un scurt și important memoriu în care arăta că legea mișcării materiei era legată în modul cel mai strîns de singularitățile cîmpului exterior. Dealtfel Einstein și colaboratorii săi au revenit ulterior de mai multe ori asupra acestui subiect, dar se pare că Georges Darmois a avut într-adevăr, cel puțin în ce privește publicarea unor asemenea idei, o prioritate incontestabilă. De zece ani încoace, s-au făcut încercări de reinterpretare a mecanicii ondulatorii, încercări în care se regăsesc, convenabil transpuse, idei analoge celor ale lui Darmois și Einstein asupra legăturii dintre mișcarea corpusculilor și cîmpurile înconjurătoare. Georges Darmois s-a interesat de aceste încercări și știm că, cu puține săptămîni înaintea morții sale, își mai propunea să reflecteze din nou la ele.

Încheind studiul lucrărilor lui Darmois asupra relativității, vom mai semnala că el s-a preocupat și de teorii care, ca și aceea a lui Einstein și a lui de Sitter, caută să precizeze forma globală a spațiului-timp, precum și de teoria expansiunii universului a lui Lemaître. Cu privire la aceste chestiuni, el a publicat în 1932 în *Comptes Rendus* două note care au fost, pare-se, ultimele din perioada „relativistă" a operei sale științifice. Nu tre-

buie să uităm însă a menţiona şi interesul pe care Georges Darmois, spirit concret, preocupat necontenit să ţină seamă de realităţile fizice, l-a arătat întotdeauna verificărilor experimentale ale relativităţii generale. El discutase adeseori acest lucru cu prietenul său Croze, care reflectase mult asupra valorii acestor verificări, şi participase la şedinţele Societăţii de Fizică din Strasbourg, unde fuseseră discutate. În 1930, în cursul Săptămînii organizate de Centrul de sinteză sub auspiciile lui Paul Langevin şi consacrate teoriei relativităţii, a ţinut o conferinţă cu privire la verificările experimentale ale acestei teorii, expunere strălucită, care a fost apoi publicată în colecţia Actualităţilor ştiinţifice şi industriale a editurii Hermann.

*

* *

L-am văzut pe Georges Darmois, devenit în 1925 lector la Institutul de Statistică din Paris, orientîndu-se treptat spre calculul probabilităţilor şi aplicaţiile lui. Încă din 1928, la Congresul internaţional al matematicienilor de la Bologna, el prezintă o notă asupra seriilor statistice care se desfăşoară în timp şi, în acelaşi an, publică la editura Doin în *Encyclopédie scientifique des Mathématiques appliquées* o expunere generală asupra statisticii matematice, expunere pe care mai tîrziu el însuşi o aprecia ca oarecum insuficientă. Dar în epoca aceea spiritul său era încă puternic îndreptat spre aplicaţiile la ştiinţele fizice şi de aceea s-a simţit fericit atunci cînd a fost invitat de Institutul Henri Poincaré în 1929 să ţină 16 lecţii despre statistica şi dinamica stelară; pentru a se familiariza cu aceste probleme, n-a ezitat să-şi petreacă o parte din vacanţă la Observatorul din Strasbourg, alături de prietenul său Danjon, făcînd apoi o expunere foarte importantă a rezultatelor obţinute în acea epocă în lumea întreagă asupra unor probleme cum sînt curenţii de stele, structura şi dinamica galaxiei. Această expunere a fost publicată în 1930 de editura Hermann în colecţia Actualităţilor şti-

inţifice şi industriale sub titlul *La Structure et les mouvements de l'univers stellaire.* Această lucrare importantă, asociată cu profundele sale studii asupra teoriei einsteiniene a gravitaţiei, a contribuit mai tîrziu la justificarea intrării regretatului nostru confrate în secţia de astronomie a Academiei noastre.

În acelaşi timp Darmois se simţea din ce în ce mai mult atras de alte aplicaţii ale statisticii şi anume acelea care se referă la domeniile economice, demografice, sociale sau chiar psihologice. Sînt domenii în care, mai mult decît în multe alte ramuri ale ştiinţei, este necesar, pentru a controla ipotezele şi rezultatele, să se dea dovadă de multă finețe şi bun simţ. Georges Darmois, care poseda într-un grad ridicat aceste calităţi, părea predestinat studiilor pe care avea să le întreprindă. Opera sa în aceste domenii ale statisticii a luat, dealtfel, două forme diferite, pe care le vom analiza succesiv: în primul rînd, el a studiat metodele statisticii şi în special anumite aspecte ale lor, în al doilea rînd, a căutat să facă cunoscute metodele sale, să răspîndească utilizarea lor, să le facă apreciate la justa lor valoare de către cei care ar avea interes să le întrebuinţeze.

Vrem mai întîi să examinăm principalele rezultate pe care Georges Darmois le-a obţinut în domeniul statisticii matematice, pe plan pur ştiinţific.

Una din ideile fundamentale pe care Darmois le-a pus în lumină este aceea a exhaustivităţii. Desigur, Fisher studiase înaintea lui un caz particular, Darmois a fost însă acela care a arătat întreaga importanţă şi valoarea generală a acestei idei. Un exemplu simplu de exhaustivitate se poate obţine considerînd o mărime aleatorie care ascultă de celebra lege a probabilităţii a lui Gauss-Laplace, lege care dă, cu ajutorul unei expresii exponenţiale, probabilitatea abaterii unei valori a mărimii în raport cu valoarea medie m în funcţie de o constantă σ, dispersia. Gruparea valorilor posibile în jurul valorii medii este cu atît mai strînsă cu cît

dispersia este mai mică. Dacă se fac n observații independente $X_1, X_2, \ldots X_n$ ale mărimii aleatorii X, se știe bine că media aritmetică

$$Y = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \ldots + X_n)$$

este o bună estimație a lui m. Dar mai există, în plus, o altă circumstanță remarcabilă: legea probabilității condiționale a n mărimi aleatorii X_1, $X_2 \ldots X_n$, cînd este dată valoarea mediei aritmetice Y, nu depinde de m. De aici rezultă că un observator care a notat valorile $X_1, X_2 \ldots X_n$ nu știe despre m mai mult decît un observator care ar cunoaște numai valoarea medie Y. Această proprietate remarcabilă a lui Y relativ la m se exprimă spunînd că Y este un „rezumat exhaustiv" pentru m. Georges Darmois a avut meritul de a fi văzut bine importanța acestei noțiuni și de a o fi generalizat în afara cazului particular al legii lui Gauss. El a determinat forma generală a legilor probabilității care admit asemenea rezumate exhaustive și, datorită lucrărilor sale, noțiunea de exhaustivitate a căpătat în toate țările mari dezvoltări și numeroase aplicații.

Cu teoria exhaustivității este înrudită o teorie mai generală, aceea a „estimatorilor" care, pentru o variabilă aleatorie X supusă unei legi a probabilității dependentă de o valoare medie m, permite să se ia în considerare o funcție $\varphi(X_1, X_2 \ldots X_n)$ care dă o estimație rațională a valorii lui m. Datorită unor lucrări efectuate de diferiți autori, și în special de confratele nostru Fréchet, această teorie a estimatorilor a fost aprofundată și s-au putut obține precizări interesante cu privire la limitele erorii ce poate fi comisă utilizînd această metodă de estimație a valorii medii m. Darmois a extins aceste rezultate în diferite moduri, în special considerînd variabile aleatorii multidimensionale și presupunînd că legea probabilității poate depinde de mai mulți parametri și nu numai de unica valoare medie m.

Legea probabilității a lui Laplace-Gauss este atît de importantă, încît se poate crede că este caracterizată de proprietăți speciale. Serge Bernstein a arătat că dacă X și Y sînt variabile aleatorii independente și dacă, în plus, $X + Y$ și $X - Y$ sînt de asemenea variabile aleatorii independente, atunci X și Y ascultă în mod necesar de legile lui Laplace-Gauss. Dar demonstrația sa, întrucîtva lărgită de Fréchet, se baza pe ipoteze destul de restrictive. Georges Darmois a reluat această demonstrație folosind mijloace foarte simple și formulînd ipoteze mult mai largi. Demonstrația sa a putut fi aplicată unor combinații mai generale decît $X + Y$ și $X - Y$ și a dat loc la numeroase lucrări.

Darmois s-a preocupat de asemenea de probleme de analiză factorială. În acest domeniu ne putem pune problema următoare: A, B, C fiind trei variabile aleatorii independente, se pot lua în considerare două alte variabile aleatorii independente X și Y, astfel încît X să fie o funcție dată de A și de C, iar Y o funcție dată de B și C. Faptul că X și Y depind de „factorul comun" C are ca rezultat că X și Y sînt în principiu „dependente". Darmois a căutat să precizeze această dependență și să vadă dacă, în cazuri particulare de determinat, X și Y n-ar putea rămîne independente. Prin raționamente elegante, el a obținut astfel un anumit număr de rezultate, care au rămas totuși oarecum fragmentare.

Acestea sînt principalele lucrări efectuate în domeniul statisticii de regretatul nostru confrate, în a treia perioadă a operei sale propriu-zis științifice. Dacă, înainte de a încheia analiza acestei opere științifice, aruncăm o privire asupra ansamblului ei, sîntem izbiți de următorul fapt. Atît în fizica matematică cît și în statistică, Georges Darmois a avut numeroase idei profunde și noi și le-a susținut prin demonstrații elegante și convingătoare. Dar aproape întotdeauna a lăsat altora, emuli sau elevi, grija de a completa opera sa și de a-i stabili solid dezvoltările și consecințele. Cu alte cuvinte, a fost, înainte de toate, un „semănător de

idei". Personalitatea sa ne permite să explicăm cu ușurință acest caracter al operei sale. Spirit fin și profund, el sesiza cu ușurință adevărurile importante și ascunse și știa să le exprime cu eleganță și precizie. Dar, ca om foarte cultivat și interesat de toate ideile noi, își îndrepta neîncetat atenția în direcții diferite, lăsînd altora, mai meticuloși, grija de a le demonstra riguros și de a le dezvolta pînă la capăt. Asemenea spirite sînt dealtfel acelea care contribuie cel mai eficace la progresul științei. Ele deschid căi pe care alții se angajează fiindcă sînt deschise. Sînt spirite animatoare ale progresului științific care, fără ele, ar fi împiedicat sau întîrziat.

*

* *

În ultima perioadă a vieții, Georges Darmois a consacrat o parte importantă a activității sale unui veritabil apostolat în vederea dezvoltării în Franța a aplicațiilor statisticii. Calculul probabilităților era demult studiat în țara noastră de către maeștri eminenți. Fără a merge înapoi pînă la ilustrul Laplace, a cărui operă în acest domeniu a fost atît de importantă, putem aminti în epoca contemporană numele lui Émile Borel, al lui Maurice Fréchet și al lui Paul Lévy. Dar obiectul principalelor cercetări a fost mai ales aspectul matematic al calculului probabilităților și în mod accesoriu aplicațiile lui la fizică. Darmois a fost treptat tot mai convins că, după exemplul țărilor anglo-saxone, în Franța aplicațiile metodelor statistice trebuiau să fie dezvoltate nu numai în științele care pînă atunci profitaseră prea puțin de ele, ca biologia sau medicina, ci în toate domeniile vieții sociale, economice, administrative ale țării.

Sarcina considerabilă pe care a ajuns astfel să o întreprindă cuprindea aspecte diverse. Trebuia, în primul rînd, să fie asigurată formarea unor specialiști calificați prin învățămînt și prin lectură. Émile Borel, primul care a înțeles importanța aplicării calculului probabilităților în domenii cum sînt teoria jocurilor, strategia militară etc., a sesi-

zat deja această necesitate. El a înființat Institutul de Statistică al Universității din Paris și, precum am văzut, venind din 1925 să țină cursuri aici, Georges Darmois a început să se orienteze către studiile de statistică. Puțin cîte puțin, el s-a consacrat din ce în ce mai mult acestui gen de învățămînt, cu începere mai ales din momentul cînd a preluat el însuși conducerea Institutului de Statistică și a devenit titularul catedrei de calculul probabilităților.

El a completat și reînnoit învățămîntul la Institutul de Statistică; a asigurat participarea nu numai a unui mare număr de profesori și de conferențiari veniți din afară, ci și a unor specialiști aparținînd administrației sau cercurilor de afaceri. Întotdeauna avea grijă să-i pună pe elevi în contact cu acele medii profesionale pentru care se pregăteau.

Prin creații noi, Darmois a adăugat Institutului de Statistică anexe importante: un centru numit de formare a inginerilor și a cadrelor, unde stagii de scurtă durată dau o rapidă inițiere statistică, în special inginerilor, precum și un Birou de cercetare operațională care se ocupă cu formarea de specialiști și cu dezvoltarea cercetărilor în acest important domeniu nou.

Trebuie să mai semnalăm că confratele nostru a consacrat două mici lucrări expunerii principiilor statisticii. Prima a apărut în editura Doin în 1928 sub titlul de *Statistique mathématique*, a doua la Armand Colin în 1934 sub titlul de *Statistique et Applications*. A completat opera sa de difuzare a metodelor statistice publicînd în diverse reviste un foarte mare număr de articole și de precizări, prezentînd numeroase comunicări la colocvii și congrese etc.

În afară de învățămînt și de publicații, Georges Darmois a completat efortul său de propagandă în favoarea aplicațiilor statisticii prin nenumărate contacte personale favorizate de gentileța sa binevoitoare. Dotat cu o mare finețe psihologică,

poseda arta de a simplifica problemele şi de a-şi convinge interlocutorii. Ştia să facă înţeleasă importanţa statisticii şi caracteristicile principale ale metodelor sale chiar şi unor nespecialişti şi unor persoane fără cunoştinţe matematice. Rolul său la Institutul internaţional de Statistică, în diverse comisii ale Naţiunilor Unite etc., se leagă şi de acest gen de propagandă în care excela.

Cunoscînd admirabil toate problemele ce se puneau în statistică, în multe reprize, prin articole sau conferinţe, Georges Darmois a atras atenţia asupra unor probleme care nu erau încă rezolvate sau chiar asupra anumitor chestiuni a căror existenţă şi importanţă le semnalase el primul. Nota sa prezentată la Congresul internaţional al matematicienilor de la Bologna în 1928, intitulată *Analyse et comparaison des séries statistiques qui se développent dans le temps* conţine numeroase idei profunde care se leagă — împrejurare destul de surprinzătoare — de dezvoltările cu totul recente ale teoriei proiectilelor teleghidate.

*

* *

Cele spuse pînă aici arată în final cît de împlinită a fost viaţa regretatului nostru confrate. Şi încă am omis să spunem că, în afară de cariera sa universitară propriu-zisă, Darmois găsise timp să fie profesor la Şcoala de mine, la Şcoala normală superioară din Sèvres şi la Centrul de perfecţionare în administrarea afacerilor al Camerei de Comerţ din Paris şi să îndeplinească succesiv funcţiile de examinator la Şcoala de mine din Nancy, la Şcoala normală superioară, la Şcoala normală superioară din Sèvres, la Şcoala naţională superioară de aeronautică şi la Şcoala navală. Multă vreme a făcut parte din Comitetul consultativ al Universităţilor şi din comisiile C.N.R.S.-ului; a făcut parte chiar din Consiliul Observatoarelor. Ar fi prea lungă enumerarea tuturor organismelor naţionale sau internaţionale din care a făcut parte şi a tutu-

ror societăților al căror membru — și adeseori temporar președinte — a fost.

La toate aceste activități trebuie să adăugăm o alta, de natură mai particulară, care adeseori nici nu îi era bănuită. Doamna Georges Darmois aparținea unei familii de proprietari de turnătorie din Saint-Dié și fratele ei a condus mult timp turnătoria familiei. După moartea cumnatului său, Georges Darmois a acceptat noua sarcină de a se duce o dată la cincisprezece zile la Saint-Dié pentru a se ocupa, împreună cu directorul, de mersul întreprinderii. Era un „violon d'Ingres" care nu displăcea unui spirit ca al său, întotdeauna la curent cu realitățile economice. Într-o zi, cineva care îl cunoștea foarte puțin îi spuse: „Știam că exista un Darmois fizician și un altul matematician, dar nu știam că exista și un Darmois turnător" — ceea ce l-a amuzat mult.

De mult timp Academia noastră recunoscuse meritele unui matematician și gînditor atît de eminent, ale cărui lucrări s-au extins la domenii atît de diverse. Încă în 1916 el obținuse o mențiune de onoare în cadrul premiului Bordin. Apoi succesiv este laureat al premiului Montyon de statistică în 1928, al premiului Henri de Parville în 1935, al premiului Bordin în 1937, al premiului d'Ormoy în 1941 și al premiului Poncelet în 1954. Confreriei noastre nu-i mai rămînea decît să-l cheme să intre în rîndurile ei. Eram cu toții de acord să dăm această consacrare înaltei valori a lucrărilor sale. Singura dificultate era de a decide în care secție urma să intre. Matematician, fizician, astronom, uneori chiar biolog, în calitatea sa de statistician, Darmois avusese activități de o asemenea varietate, încît dispunea de titluri pentru a intra în mai multe din categoriile între care se împart membrii Academiei noastre. În cele din urmă a fost chemat să ia loc în confreria noastră în secția de astronomie, la 21 noiembrie 1955. Fără îndoială, această „afectare" s-a datorat întrucîtva hazardului locurilor vacante care se produc în mod inopinat printre noi, ceea ce demonstrează bine importanța, subli-

niată atît de des de Darmois însuși, a fenomenelor aleatorii în treburile umane. Intrînd în Academie, noul nostru confrate îl regăsea aici pe propriul său frate, Eugène Darmois, care de cîțiva ani deja făcea parte din secția de fizică. Timp de trei ani, cei doi frați aveau să rămînă împreună în rîndurile noastre. Devenit academician, Georges Darmois a fost întotdeauna foarte activ la ședințele noastre. A pus întotdeauna la dispoziția comisiilor și a secretariatului nostru toate resursele vastelor sale cunoștințe și ale inepuizabilei sale complezențe.

În calitate de corespondent al Biroului de longitudini în 1946, era de asemenea foarte activ la reuniunile acestui birou. Și-a asumat chiar sarcina de a face în Anuarul Biroului de longitudini pe anul 1952 o foarte importantă notă cu privire la „estimarea mărimilor prin măsurarea lor". A fost numit membru titular al acestui corp savant în 1959, din nenorocire cu puțin timp înaintea morții sale.

Se apropia de vîrsta pensionării universitare cînd sănătatea sa începu să se zdruncine. Moartea fratelui său Eugène, survenită în noiembrie 1958, acest frate cu care fusese crescut împreună și a cărui carieră fusese atît de paralelă cu a sa, a fost pentru el un doliu crud. În ciuda bolii, el a păstrat mereu o mare luciditate a spiritului și a continuat să-și îndeplinească cu curaj obligațiile aproape pînă în ultimele zile ale vieții sale.

L-am pierdut pe Georges Darmois la 3 ianuarie 1961. Astăzi se odihnește în micul cimitir din Eply, alături de fratele său, aproape de părinții săi, care „au fost tinerețea lui fericită", așa cum a spus-o în discursul său de recepție la Academie. Primarul din Eply a dispus ca în sala de onoare a primăriei să fie așezată fotografia celor doi frați, onoarea micului oraș, fotografie pe care i-o trimisese doamna Georges Darmois.

Georges Darmois poseda toate calitățile spiritului și ale inimii. Inteligența sa plină de finețe era excepțională, cunoștințele sale erau pe cît de solide, pe atît de vaste, memoria sa era prodigioasă.

Toţi cei care l-au cunoscut vor păstra amintirea bunăvoinţei sale, a delicateţei caracterului său, a simpatiei pe care o inspira de la primul contact. Stima şi afecţiunea cu care îl înconjurau toţi acei care îl cunoşteau, colegi, prieteni sau elevi, s-au manifestat în mod deosebit de emoţionant atunci cînd, la 12 ianuarie 1957, i-a fost remisă, conform ritualului consacrat, spada de academician. Această ceremonie, care, din cauza unor împrejurări oarecum speciale, a avut loc la Cercul Militar din piaţa St.-Augustin, reunea un mare număr de persoane aparţinînd unor medii foarte diverse, universitare, tehnice sau comerciale cu care îl pusese în contact evantaiul foarte larg al preocupărilor sale, în cursul unei vieţi destul de agitate.

El nu avea însă, vai!, să supravieţuiască mult timp acestei frumoase consacrări a carierei sale ştiinţifice. Vom păstra toţi cu pietate amintirea acestui confrate, savant eminent şi om atît de simpatic, care ne-a fost răpit prematur, după ce a petrecut prea puţin timp printre noi.

NOTĂ DESPRE VIAȚA ȘI OPERA LUI JEAN BECQUEREL

Citită în ședința anuală a Academiei de Științe din 9 decembrie 1963

Domnilor,

În domeniul literelor, științelor și artelor s-au văzut uneori apărînd, în cursul istoriei, oameni aparținînd unor generații succesive ale aceleiași familii, care s-au manifestat cu strălucire în același domeniu și ale căror opere par a se prelungi și a prezenta o linie de continuitate. Pentru a nu da decît două exemple din istoria științelor, putem cita familia Bernoulli și familia Cassini. Totuși asemenea exemple, deși există, sînt rare, căci transmiterea prin ereditate a calităților intelectuale este capricioasă, iar împrejurările, adeseori aleatorii, care orientează destinele individuale împiedică de cele mai multe ori pe membrii aceleiași descendențe de a urma căi paralele.

În știința franceză, de un secol și jumătate, cel mai remarcabil exemplu al unei familii care a dat în decurs de mai multe generații cercetători ce au lucrat cu un succes deosebit în aceeași ramură a științei și chiar, s-ar putea spune, într-o direcție aproape unică, a fost, desigur, familia Becquerel. Din tată în fiu, patru fizicieni cu acest nume au făcut parte din confreria noastră, fiecare din ei devenind celebru printr-o operă considerabilă și de cea mai înaltă calitate, care se referă în principal la studiul electricității, al opticii și al radiațiilor și, privite în retrospectiva de care dispunem

astăzi pentru a le judeca, lucrările lor ne apar ca prelungindu-se și completîndu-se reciproc. Așa încît ni s-a părut cu deosebire indicat să consacrăm una din notele care sînt prezentate anual în această incintă ultimului reprezentant al acestei celebre familii de fizicieni, lui Jean Becquerel, pe care mulți dintre noi l-au cunoscut și a cărui operă, minuțioasă și totodată foarte vastă, nu este poate întotdeauna apreciată la justa valoare din cauza complexității ei.

Nu se poate însă vorbi despre Jean Becquerel fără a evoca mai întîi pe scurt originile familiei căreia îi aparținea și figura iluștrilor fizicieni al căror descendent era și a căror operă a continuat-o.

Familia Becquerel pare a fi de origine flamandă și o găsim, acum trei secole, locuind în regiunea Amiens. După ce s-a instalat o vreme la Paris, s-a stabilit la Châtillon-Coligny, în actualul departament Loiret. Aici găsim, sub domnia lui Ludovic al XVI-lea, un Becquerel exercitînd funcțiile de locțiitor al regelui în regiune. Fiul său, care i-a succedat în acest post, a devenit în timpul revoluției administrator al regiunii Loiret: el a fost tatăl lui Antoine-César Becquerel, primul din marea dinastie a Becquerelilor fizicieni.

Antoine-César Becquerel, născut în 1788 și care avea să atingă vîrsta de 90 de ani, a intrat în 1806 la Școala politehnică, a terminat, în cadrul ei, arma geniului și a luat parte activă la războaiele napoleoniene în Spania și în Rusia. Decorat cu Legiunea de onoare, a mai luat parte și la campania din Franța în 1814, apoi a părăsit armata cu gradul de comandant de batalion. De atunci, acest militar de 27 de ani se orientează spre știință: intră la Muzeul de istorie naturală, pe care descendenții săi nu aveau să-l mai părăsească. Cariera sa de savant este rapidă și prestigioasă. La 41 de ani, în 1829, devine membru al Academiei de Științe unde va rămîne timp de patruzeci și nouă de ani. În 1838, se creează pentru el la muzeu o catedră de fizică aplicată la științele naturale. Întrucît pe atunci nu exista în această instituție o vîrstă de pensionare, va ocupa această catedră și în al

nouăzecilea an al vieții sale. Nu e cazul să expunem aici în cîteva rînduri opera colosală a lui Antoine-César, care a format obiectul a circa cinci sute de memorii sau lucrări. Această operă a cuprins în principal ştiința, pe atunci încă foarte tînără, a electricităţii. El este cel care a descoperit primul şi studiat fenomenele termoelectrice şi a făcut primele aplicaţii tehnice ale lor, preludii ale tuturor acelora, atît de numeroase şi atît de importante, care există astăzi. El a realizat, înaintea lui Daniell, primele pile cu depolarizarea electrozilor, care permit obținerea unor curenţi constanţi. În electrometalurgie a fost un precursor şi un realizator remarcabil. Întreaga sa viaţă a reflectat profund asupra relațiilor ce există între fenomenele electrice şi acelea în care intervin căldura şi lumina. Iar aceste cercetări, atît de diverse şi atît de greu de efectuat cu mijloacele restrînse de care dispuneau atunci fizicienii, el le-a urmărit pînă la adînci bătrînețe.

Cel care a preluat făclia scăpată din mîinile slăbite ale părintelui a fost al treilea fiu al său, Edmond Becquerel. Acesta fusese mai întîi preparatorul, colaboratorul, confidentul tatălui său pe care îl ajutase permanent la lucrările sale şi la cursurile sale la muzeu. Elev strălucit, el fusese admis la Şcoala politehnică, dar renunțase să intre aici, spre a se consacra în întregime sarcinii de a-şi ajuta tatăl şi de a realiza împreună cu el o operă devenită din acel moment comună. Cariera lui științifică avea să fie şi ea strălucită, întrucît, născut în 1820, el a devenit, în anul 1863, alături de tatăl său, membru al confreriei noastre, iar la moartea acestuia, în 1878, titularul catedrei de fizică la muzeu, catedră pe care avea s-o ocupe pînă la moartea sa, la 71 de ani, în 1891. Lucrările sale s-au axat în special pe electrochimie şi electroliză, contribuind mult la cunoașterea naturii şi legilor lor. A efectuat, de asemenea, foarte importante cercetări asupra paramagnetismului şi a polarizării rotatorii magnetice, recent descoperită de Faraday. În acest fel, el deschidea căi naturale pentru nepotul său Jean care, un secol mai tîrziu,

avea să strîngă o recoltă bogată în rezultate foarte importante. Dar partea cea mai esențială poate a operei lui Edmond Becquerel a fost consacrată fenomenelor în care energia luminii se transformă în energie chimică sau electrică și fenomenelor inverse. Studiul fosforescenței i-a reținut atenția în toată perioada finală a vieții sale. În acest domeniu, a studiat amănunțit numeroase cazuri și a încercat să-i determine cu precizie modalitățile și legile. Și astfel el deschidea calea pe care avea să se angajeze fiul său Henri, ajungînd să facă una dintre cele mai importante descoperiri ale științei moderne.

Henri Becquerel, al doilea fiu al lui Edmond, avea, într-adevăr, să continue dinastia Becquerelilor fizicieni. Născut în 1852, el urmează tradiția familiei sale intrînd la Școala politehnică și devine inginer de poduri și șosele. Strîns asociat la lucrările tatălui său, studiază împreună cu el fenomenul polarizării rotatorii magnetice descoperit de Faraday și îi determină legile. În 1888 susține o teză de doctorat asupra absorbției luminii în cristale, în speță în pămînturile rare, și astfel în lucrările sale din tinerețe par deja a se contura liniile mari ale operei fiului său. Apoi, urmînd tatălui său la catedra de fizică de la muzeu, devenit profesor la Școala politehnică și membru al Academiei noastre din 1889, el își orientează în special lucrările spre studiul fenomenelor de luminescență. Și deodată, la începutul anului 1896, apare imensa descoperire, aceea care va sta la originea întregii fizici nucleare contemporane: punerea în evidență a radioactivității uraniului. Prea adesea au fost expuse împrejurările curioase ale acestei mari descoperiri pentru a mai fi necesar să le amintim aici. Extrema ei importanță fiind imediat recunoscută, Henri Becquerel se bucură de acum înainte de renume internațional. El nu întîrzie dealtfel să constate existența a trei radiații emise de uraniu și denumite α, β și γ, vede apoi pe Pierre și Marie Curie completîndu-i opera prin răsunătoarea descoperire a radiului. De atunci, cele mai înalte recom-

pense vin să încununeze lucrările sale. În 1903 i se acordă premiul Nobel pentru fizică, pe care îl împarte cu Pierre și Marie Curie, și în 1908 îl înlocuiește pe Albert de Lapparent ca secretar perpetuu al Academiei noastre. Dar chiar în acest an 1908, moare subit în luna august de o criză cardiacă, în vîrstă de numai 56 de ani.

Henri Becquerel se căsătorise prima oară cu fiica fizicianului Jamin, care a fost și el membru al Academiei noastre și unul din secretarii ei perpetui din 1884 pînă în 1886. Jamin realizase lucrări foarte frumoase în domeniul opticii și își legase în special numele de dispozitivul interferențial denumit „oglinzile lui Jamin". Dacă voi mai adăuga că un nepot al lui Henri Becquerel, Paul Becquerel, avea să devină un specialist eminent în biologia vegetală, om de o înaltă cultură care a fost profesor la Universitatea din Poitiers și membru corespondent al Academiei noastre, ne vom putea da seama cărei remarcabile familii de mari savanți aparținea Jean Becquerel.

*

* *

Jean Becquerel s-a născut la Paris, la 5 februarie 1878 din prima căsătorie a lui Henri Becquerel cu domnișoara Jamin. Mama sa a murit la 20 de ani, scurt timp după nașterea lui, astfel încît el a fost crescut exclusiv de tatăl său. Copil precoce, cu o inteligență foarte vie, a fost un elev eminent și, urmînd tradiția familiei sale, s-a pregătit pentru Școala politehnică unde a fost admis cu un succes strălucit în 1897 și pe care, ca și tatăl său, a absolvit-o ca inginer de poduri și șosele. Atras, fără îndoială prin ereditate, către cercetarea științifică, el devine în 1903 asistent al tatălui său la muzeu. După moartea prematură a acestuia, la vîrsta de numai 30 de ani va fi numit fără dificultate titular al catedrei de fizică de la muzeu, într-atît părea de firesc ca un al patrulea Becquerel să urmeze primilor trei în acest post. În acest

laborator va lucra de acum înainte în tot cursul vieţii sale. Rămîne însă în strînsă legătură cu Şcoala politehnică unde, începînd din 1911, exercită funcţiile de repetitor adjunct, apoi în 1919 devine repetitor titular şi profesor suplinitor; în sfîrşit, în 1924, este numit examinator, post pe care îl va păstra pînă la pensionare.

În cariera sa rectilinie şi simplă, consacrată în întregime muncii, puţine lucruri sînt de semnalat. Academia de Ştiinţe, care încă din 1899 încurajase debuturile sale în cariera ştiinţifică atribuindu-i premiul Rivot rezervat celor mai buni elevi ai Şcolii politehnice, i-a conferit mai tîrziu, în 1913, premiul Hughes şi în 1936 premiul La Caze. În sfîrşit, în ianuarie 1946 îi urmează lui Jean Perrin la secţia de fizică generală a Academiei noastre. La sfîrşitul vieţii era comandor al Legiunii de onoare. Astfel, după ce am spus în cîteva cuvinte esenţialul asupra carierei sale, rezervîndu-ne dreptul de a reveni mai departe asupra persoanei sale şi a cîtorva aspecte ale vieţii sale particulare, să abordăm acum analiza operei sale ştiinţifice.

După cîteva lucrări din tinereţe, dintre care unele nu s-au confirmat ulterior, Jean Becquerel s-a orientat rapid spre cercetări care continuau cu mare exactitate linia acelora pe care le urmăriseră străbunicul, bunicul şi tatăl său. În acea perioadă, atenţia fizicienilor era atrasă cu deosebire de studiul fenomenului descoperit de Zeeman în 1896 şi cunoscut sub numele de efectul Zeeman. Se ştie că acest fenomen constă într-o descompunere în mai multe linii, sub acţiunea unui cîmp magnetic, a liniilor spectrale emise în mod normal de un atom. Existenţa efectului Zeeman fusese prezisă de Lorentz cu ajutorul teoriei sale despre electroni, fiind unul dintre marile succese ale acestei teorii. Efectul Zeeman fusese observat mai ales la gaze sau lichide şi se ştie că era în realitate mult mai complicat decît prevedea teoria lui Lorentz, verificată numai în cazuri simple. Jean Becquerel a avut, din 1906, ideea de a studia sistematic acest fenomen în cazul cristalelor, în special la compuşii

pămînturilor rare. Foarte curînd a constatat că în acest caz efectul Zeeman prezintă caractere cu totul diferite de acelea ce fuseseră întîlnite pînă atunci. În special, se observă uneori un decalaj al liniilor spectrale în scara frecvențelor prin efectul cîmpurilor magnetice, decalaj care este inversul aceluia pe care îl prevede teoria efectului Zeeman normal. În vremea în care acest fapt, ce părea curios, era astfel descoperit, semnul decalajului liniilor spectrale observate în mod normal se interpreta, după Lorentz, ca o expresie a valorii negative a sarcinii electronului. Jean Becquerel, ca dealtfel și alți fizicieni, a fost astfel condus să creadă că decalajul invers pe care îl observa revela existența în materie a unor electroni pozitivi și a făcut cîteva experiențe spre a încerca să pună direct în evidență această existență. A trebuit să renunțe la această părere și să admită că electronii prezenți în mod normal în materie sînt, într-adevăr, toți negativi. Astăzi știm că există electroni pozitivi, dar acești „pozitoni" nu apar decît în mod excepțional și n-au decît o durată de viață foarte scurtă: ei nu sînt cei pe care îi imagina Jean Becquerel, iar teoriile contemporane interpretează în cu totul altă direcție, cu ajutorul unor concepții noi, inversiunea decalajului liniilor spectrale, pe care el o observase. Dar atunci cînd făcuse această descoperire, era firesc să se caute a se interpreta fenomenul prin prezența normală în materie a unor electroni pozitivi și, independent de orice interpretare, el avusese meritul de a semnala un fapt cu totul nou.

Cam în aceeași perioadă a avut o idee nouă, care avea să se dovedească foarte fructuoasă și să orienteze de aici înainte toate cercetările sale ulterioare: aceea de a studia acțiunea temperaturilor foarte joase asupra emisiei, propagării și absorbției luminii în materie. El avea să creeze astfel „optica la temperaturi joase", ramură nouă a opticii, al cărei adevărat creator este și căreia avea să-i consacre de aici înainte cea mai mare parte a cercetărilor sale personale. Acest gen de lucrări le-a început la

muzeu, dar mijloacele de care dispunea în laboratorul său nu-i permiteau deloc să realizeze temperaturi inferioare celei de —200 grade centigrade. Recunoscînd marele interes pe care îl prezenta utilizarea unor temperaturi foarte joase, a luat obiceiul, cu începere din 1908, de a merge frecvent să lucreze la laboratorul criogen din Leiden, unde putea dispune de temperaturi mult mai joase, de ordinul acelora de lichefiere a hidrogenului și heliului. Astfel a început între Jean Becquerel și oamenii de știință care lucrau în laboratorul din Leiden o colaborare rodnică ce s-a prelungit ani îndelungați. La început laboratorul criogen era condus de Kamerlingh Onnes, care l-a înființat. După moartea sa, conducerea a fost preluată de Johannes de Haas. Acești doi eminenți savanți, care au fost asociații din străinătate ai Academiei noastre, erau înconjurați de colaboratori de valoare, specializați în studiul temperaturilor foarte joase și Becquerel se afla acolo într-un mediu deosebit de favorabil dezvoltării lucrărilor sale.

Unul din primele rezultate puse în evidență în acest domeniu de către Jean Becquerel a fost marea simplificare pe care o prezintă spectrele de absorbție ale cristalelor atunci cînd sînt puternic răcite. Cînd temperatura coboară, se pot vedea benzile de absorbție observate la temperatura obișnuită descompunîndu-se în linii spectrale, acestea devenind ele însele mai puțin numeroase și mai fine. La temperaturi foarte joase, de ordinul a cîteva grade Kelvin, unele linii dispar și un mare număr din ele slăbesc după ce au trecut printr-un maximum de intensitate. Este deci vorba aici de fenomene foarte complexe a căror interpretare detaliată este dificilă. Totuși Becquerel a observat foarte clar că această simplificare a spectrelor este datorată simplificării structurilor materiale la temperaturi foarte joase. Agitația termică are ca efect că, la temperaturi obișnuite, edificiile atomice sau moleculare sînt frecvent aduse la niveluri de energie cuantificată superioară nivelului de energie minimă normală. De aici rezultă posibilitatea unor

numeroase tranziții cuantice corespunzînd unor fenomene de emisie și de absorbție a luminii. De aici bogăția și complexitatea, la temperaturi obișnuite, a spectrului de absorbție al cristalelor studiate de Becquerel. La temperaturi foarte joase însă agitația termică tinde să dispară progresiv, iar edificiile atomice și moleculare tind să se imobilizeze în starea lor de energie cuantificată minimă, tranzițiile cuantice posibile diminuează, iar structura spectrelor de absorbție se simplifică. Astfel numeroasele și minuțioasele observații ale lui Jean Becquerel în acest domeniu permit să se vadă într-un mod foarte izbitor diminuarea agitației termice și — dacă ne putem exprima astfel — „congelarea" la temperaturi foarte joase a structurilor materiale.

O altă serie de cercetări remarcabile ale regretatului nostru confrate s-a îndreptat spre polarizarea rotatorie magnetică a cristalelor. Fenomenul polarizării rotatorii fusese descoperit pe la mijlocul secolului trecut de către Faraday (1845). Încă din 1854, Verdet enunța legea care-i poartă numele, după care rotația planului de polarizare a luminii în timpul traversării unui corp transparent supus unui cîmp magnetic este proporțională cu cîmpul magnetic aplicat și cu grosimea corpului traversat.

Constanta de proporționalitate a primit numele de „constanta lui Verdet". Henri Becquerel se preocupase mult de acest fenomen și îi consacrase a doua sa teză de doctorat. În 1897 el a dat o expresie a constantei lui Verdet în funcție de dispersia corpului traversat (adică de variația indicelui de refracție în funcție de lungimea de undă), iar această formulă a lui Henri Becquerel a permis ulterior ca din faptele observate să fie dedusă valoarea numerică a faimoasei constante $\frac{e}{m}$, raportul dintre sarcina electrică și masa electronului, ceea ce dovedea odată mai mult intervenția electronului în propagarea luminii în interiorul unui

corp transparent. Or, este știut că proprietățile magnetice ale corpurilor se prezintă sub două forme diferite: diamagnetismul și paramagnetismul. Diamagnetismul se manifestă în toate corpurile materiale: el depinde exclusiv de structura internă a atomilor, este deci independent de temperatură și se traduce printr-o magnetizare a corpului în sens invers față de cîmpul care îi este aplicat. Paramagnetismul, dimpotrivă, nu există decît pentru corpurile ai căror atomi și molecule au un moment magnetic ne-nul: el rezultă dintr-o aliniere parțială a acestor momente, produsă de acțiunea unui cîmp magnetic exterior, dar contracarată de agitația termică. Paramagnetismul, care se traduce printr-o magnetizare a corpului în sensul cîmpului aplicat, este deci funcție de temperatură și diminuează rapid atunci cînd temperatura crește. Celebrele teorii ale lui Paul Langevin asupra diamagnetismului și paramagnetismului au contribuit mult la o mai bună înțelegere a originii și deosebirilor dintre cele două fenomene care se suprapun în cazul corpurilor paramagnetice, al doilea fenomen fiind deci mult mai important decît primul. Or, legea lui Verdet completată cu formula lui Henri Becquerel conducea la considerarea puterii rotatorii a corpurilor ca independentă de temperatură, adică ca un efect de tip „diamagnetic". În jurul acestei probleme s-au ridicat controverse și s-a pus întrebarea dacă nu există și o putere rotatorie de tip „paramagnetic", adică dependentă de temperatură. O mare descoperire făcută de Jean Becquerel în lucrările executate tocmai în perioada 1925—1930 a fost punerea în evidență la unele corpuri transparente a unei polarizări rotatorii paramagnetice. Ca orice fenomen de tip paramagnetic, efectul respectiv trebuie să se amplifice rapid atunci cînd temperatura coboară. Și într-adevăr, într-o serie de cercetări foarte numeroase și foarte minuțioase, ca toate pe care le întreprindea, Becquerel a arătat că polarizarea rotatorie magnetică, adeseori deja importantă la temperatura ambiantă, crește considerabil atunci

cînd temperatura coboară mult. Astfel la temperatura de 1,5 grade absolute, rotația planului de polarizare produsă de lama unui cristal de tysonit de un milimetru grosime într-un cîmp de 27 000 gauss poate atinge enorma valoare de 1 530 grade pentru radiația verde a mercurului.

Pe baza datelor experimentale, Jean Becquerel a putut stabili care era variația puterii rotatorii în funcție de cîmpul magnetic și de temperatură. Așa cum era de așteptat, formula care exprimă puterea rotatorie a unui corp paramagnetic este strîns legată de aceea care dă magnetizarea lui și se compune din doi termeni: primul, de tip diamagnetic, proporțional cu cîmpul și cu grosimea traversată, este independent de temperatură și corespunde exact legii lui Verdet-Henri Becquerel, în timp ce al doilea, de tip paramagnetic, de asemenea proporțional cu cîmpul și cu grosimea traversată, variază invers proporțional cu temperatura. Acest al doilea termen este acela care devine în întregime preponderent la temperaturi foarte joase și care produce enormele rotații ale planului de polarizare observate de Jean Becquerel.

Ca fizician foarte scrupulos, Becquerel nu se mărginea să observe cu grijă fenomenele, ci căuta și să le interpreteze, chiar cu prețul unor calcule lungi și dificile pe care le executa el însuși. Pentru a descurca încîlceala complicată a fenomenelor pe care le studia, s-a menținut adeseori în contact cu doi eminenți fizicieni teoreticieni, specialiști în teoriile cuantice, olandezul H.A. Kramers, astăzi decedat, și americanul J.H. Van Vleck, ale căror nume figurează pe lista membrilor noștri corespondenți.

Teoria lui Langevin, sub forma ei inițială sau sub forma puțin modificată pe care i-o dăduse Léon Brillouin introducînd în ea concepțiile cuantice, nu este riguros valabilă decît pentru gazele perfecte. Ea prevede o saturare a magnetizării paramagnetice prin valorile ridicate ale raportului $\frac{H}{T}$ dintre cîmpul magnetic aplicat și temperatura ab-

solută. În 1923 Kamerlingh Onnes și Woltjer, studiind magnetizarea sulfatului de gadoliniu la temperatură foare joasă (1,3K) sub acțiunea unui cîmp magnetic ridicat (22 000 gauss), ajunseseră aproape să obțină palierul de saturare, cu toate că un cristal de sulfat de gadoliniu este ceva foarte diferit de un gaz perfect. Or, în 1929, Jean Becquerel și-a dat seama, atît pe baza studiului descompunerii benzilor de absorbție sub influența unui cîmp magnetic, cît și pe baza studiului polarizării rotatorii magnetice la cele mai joase temperaturi realizabile, că în cristalele pe care le studia trebuie să existe un cîmp electric datorat unor ioni asemănători cu ionii magnetici. Acest „cîmp cristalin" ar fi elementul care ar descompune stările energetice existente în ionii liberi și care ar fi astfel la originea efectelor foarte complexe care sînt în general observate. Dacă Kamerlingh Onnes și Woltjer au putut obține cu sulfatul de gadoliniu un rezultat simplu destul de neașteptat, acest lucru este datorat faptului că în acest corp magnetizarea trebuie atribuită exclusiv spinilor electronilor asupra cărora cîmpul electric nu acționează în așa fel încît ionul gadoliniu să se comporte ca un ion liber; dar acesta este un caz cu totul excepțional.

Introducerea noțiunii de cîmp cristalin în teoria cuantică a paramagnetismului a permis lui Kramers, Van Vleck și colaboratorilor lor să obțină formule interesante de comparat cu experiența. Astfel, începînd din 1929, Jean Becquerel s-a străduit în mod deosebit să studieze experimental, din acest punct de vedere, corpuri aparținînd familiei fierului (mangan, fier, nichel) și corpuri din familia pămînturilor rare. În cursul acestor cercetări, el a reușit să obțină pentru prima oară, cu etilsulfații de disproziu și de erbiu, saturarea paramagnetică completă conformă cu teoriile, rezultat remarcabil care mergea mult mai departe decît observațiile anterioare ale unei saturări, apropiată doar de a sulfatului de gadoliniu, ale lui Kamerlingh Onnes și Woltjer.

O altă descoperire importantă a fost făcută de Jean Becquerel studiind anumiți carbonați cu conținut de fier și în special mesitita de Traversella pe care i-a procurat-o noul nostru confrate d-l Orcel. Studiind polarizarea rotatorie produsă de acest corp la diverse temperaturi foarte joase, el a observat fenomene de remanență și de ciclu de magnetizare analoge acelora care sînt clasice în feromagnetism. Aceste fenomene, cărora Jean Becquerel le-a dat denumirea de „metamagnetism" și pentru care a încercat să dezvolte o teorie, sînt fără îndoială înrudite întrucîtva cu acelea care au fost observate de Cotton și Mouton cu anumiți coloizi, ceea ce le-a permis să fabrice niște magneți transparenți destul de curioși.

Desfășurate timp de ani îndelungați cu multă conștiinciozitate și perseverență, cercetările lui Jean Becquerel pe care le-am analizat pînă aici ne-au permis să cunoaștem o masă enormă de fapte noi în domenii care, înaintea lui, rămăseseră total neexplorate. Desigur, teoriile actuale, chiar cu ajutorul concepțiilor cuantice, sînt, cred, departe de a fi permis interpretarea a tot ceea ce a observat el. Acesta însă este un motiv în plus pentru a considera că foarte numeroasele memorii în care el a consemnat rezultatele minuțioaselor sale lucrări experimentale vor continua multă vreme să constituie documente prețioase pentru fizicienii viitorului.

N-aș putea încheia această analiză a lucrărilor lui Jean Becquerel fără a spune ceva despre ceea ce a făcut el, în serviciul apărării naționale, în timpul războiului din 1914—1918. Mobilizat la începutul războiului cu gradul de căpitan de geniu teritorial, el este atașat pe lîngă guvernatorul militar din Paris și însărcinat să conducă diverse lucrări de construcție în regiunea pariziană. Apoi, în octombrie 1915, cînd încep să se organizeze cercetările științifice pentru apărarea națională, Edmond Perrier, directorul muzeului și pe atunci președinte al Academiei de Științe, îl desemnează spre a face parte dintre cei care se vor ocupa cu

aceste cercetări. El lucrează în special pentru marină în laboratorul său de la muzeu și la Toulon. Cu ajutorul lui Matout, care a fost mult timp asistentul și colaboratorul său devotat, pune la punct un sistem de semnalizare optică între nave, care permite transmiterea secretă a semnalelor Morse. Acest aparat ușor, puțin voluminos, foarte practic de folosit pe mare, realiza un progres simțitor față de aparatele deja existente, în special în ceea ce privea distanța comunicărilor.

A făcut, de asemenea, numeroase cercetări asupra microfoanelor submarine, problemă foarte importantă în acel moment. A pus la punct tipuri noi de asemenea microfoane și, perfecționîndu-le puțin cîte puțin, a obținut rezultate foarte interesante. Astfel și în aceste domenii de cercetări, întrucîtva speciale, a știut să-și arate calitățile sale de fizician competent și de experimentator abil.

*

* *

În afara importantelor sale cercetări personale, despre care am căutat să dăm o privire de ansamblu, Jean Becquerel a urmărit întotdeauna cu interes și discernămînt etapele de dezvoltare a ideilor fundamentale ale fizicii contemporane. Urmărind cu asiduitate în tinerețe strălucitele cursuri de fizică pe care Paul Langevin le ținea atunci la Collège de France, el reflectase profund asupra constituției atomice a materiei, asupra termodinamicii statice, asupra teoriei relativității și a teoriei cuantelor. În numeroase publicații și conferințe, a făcut el însuși expuneri interesante cu privire la anumite aspecte ale acestor probleme. După cum era firesc, a revenit adeseori asupra descoperirii radioactivității și a dezvoltării acestei atît de importante ramuri noi a fizicii. A publicat, în special, în 1924, în colecția Payot, o lucrare intitulată *La Radioactivité et les transformations des éléments*.

Dar a arătat un deosebit interes dezvoltării teoriei relativității. Cunoștea foarte bine bazele acestei teorii și în publicațiile sale, în mai multe rîn-

duri, a respins obiecţiile eronate şi mereu repetate ce i se adresau. În această ordine de idei, lui i se datorează o foarte frumoasă carte publicată în 1922, în editura Gauthier-Villars, sub titlul *Le Principe de Relativité et la théorie de la Gravitation*, în care a expus bazele şi aplicaţiile teoriei lui Einstein sub forma ei restrînsă şi sub forma generalizată. Lectura cărţii lui constituie şi la ora actuală o excelentă introducere în studiul acestor dificile probleme. În aceeaşi perioadă, a făcut şi o expunere mai elementară a teoriei lui Einstein, în colecţia Payot.

În plus, Becquerel a desfăşurat tot în acest domeniu al teoriei relativităţii cercetări într-adevăr personale. Astfel a studiat în amănunţime cîmpul de gravitaţie al unei sfere materiale şi a precizat semnificaţia fizică a formulei lui Schwarzschild, într-o interesantă broşură apărută în 1923 în editura Hermann. Problemele ridicate de teoria lui Einstein n-au încetat niciodată să-l preocupe şi la sfîrşitul vieţii sale, cînd ieşirea la pensie i-a lăsat mai mult timp pentru lucrările sale personale, a reluat studiul lor. În *Comptes Rendus* din 1951 ale Academiei noastre se află două note scrise de el asupra încetinirii cursului timpului într-un cîmp de gravitaţie şi asupra noţiunii de timp într-un asemenea cîmp. Iar în 1953, adică chiar în anul morţii sale, el a mai publicat în *Comptes Rendus*, în colaborare cu Couderc, două note despre deplasarea liniilor spectrale ale galaxiilor şi despre consecinţele expansiunii universului în legătură cu explorarea spaţiului cosmic. Autorul prezentei note îşi permite să adauge că a avut de cîteva ori ocazia să discute cu el asupra acestui gen de probleme şi că a păstrat o interesantă scrisoare în care Jean Becquerel îi semnala o modalitate nerelativistă de a interpreta deplasarea spre roşu a radiaţiilor emise într-un cîmp de gravitaţie, făcînd să intervină acţiunea acestui cîmp asupra mişcării fotonilor.

Regretatul nostru confrate a fost şi un foarte remarcabil profesor şi toţi cei care l-au ascultat

expunînd probleme complexe ştiu că o făcea cu o foarte mare precizie şi într-un mod foarte instructiv. Cursurile pe care le-a ţinut la Şcoala politehnică prin anii 1919—1921 n-au fost publicate, nici acelea pe care le-a ţinut ani îndelungaţi la muzeu. A publicat totuşi ceea ce s-ar putea considera ca începutul unui curs de fizică generală, în două volume, apărute la Hermann în 1924 şi 1926. Primul volum este consacrat termodinamicii, iar al doilea elasticităţii şi acusticii. Este desigur regretabil că nu a terminat publicarea cursului de fizică generală, pe care aceste două prime volume îl începeau. Deosebit de interesant este volumul consacrat termodinamicii: Becquerel expune în el această ramură a fizicii, dezvoltînd, fireşte, principiile şi formulele clasice, dar considerîndu-le permanent din punctul de vedere al teoriei atomice a materiei şi interpretîndu-le, în cele din urmă, prin mecanica statistică. Se ştie cît de greu este de făcut într-o manieră corectă o asemenea expunere: ea poate fi comparată cu un drum presărat cu capcane. Jean Becquerel a ştiut să se achite în mod remarcabil de această sarcină dificilă: citindu-i cartea, se observă claritatea analizelor pe care le-a prezentat asupra principiului lui Carnot-Clausius, asupra deosebirii dintre energia liberă a lui Helmholtz şi energia utilizabilă a lui Gouy, asupra teoriei fluctuaţiilor etc.

Volumul consacrat elasticităţii şi acusticii este de asemenea foarte interesant. Mare amator de muzică, Jean Becquerel a insistat, fireşte, mult asupra aplicaţiilor acusticii la muzică. Astfel cele patruzeci şi una de pagini pe care le-a consacrat muzicii în expunerea sa de acustică au fost publicate separat, sub formă de broşură, de către editura Hermann în 1926 pentru cei care se interesează de aspectul ştiinţific al muzicii.

În rezumat, din cele ce preced se vede că, în afară de opera sa personală în optica temperaturilor

joase, Jean Becquerel a posedat o cunoaștere aprofundată a tuturor ramurilor fizicii generale și a făcut chiar cercetări originale în domenii dificile ale fizicii teoretice.

*

* *

Îmi rămîne, înainte de a termina, să evoc persoana însăși a lui Jean Becquerel și cîteva amănunte din viața sa.

Era de statură mică și foarte vioi. Își susținea adeseori părerile cu o foarte mare ardoare, dar era întotdeauna curtenitor, afabil și binevoitor. Era un om de o mare sensibilitate și de o foarte înaltă valoare morală. Muncitor neobosit, se scula devreme spre a se așeza la lucru și adeseori sosea la laboratorul său cu mult înaintea colaboratorilor lui. Cu toate că lucra în strînsă colaborare cu alți oameni de știință, îndeosebi cu Kramers și Van Vleck, efectua și controla el însuși toate experiențele și toate calculele sale, considerînd că un adevărat om de știință trebuie întotdeauna să-și verifice el însuși propria sa muncă.

Din nefericire a avut, în tot cursul vieții sale, o sănătate șubredă. Pare să fi moștenit de la străbunicul său, celebrul Antoine-César Becquerel, o oarecare debilitate pulmonară. La 15 ani avusese o pleurezie și un prim atac de tuberculoză. Mai tîrziu a suferit două reșute din care una în timpul războiului din 1914 la Toulon, a cărui climă, comportînd adesea variații bruște de temperatură, îi era nefavorabilă. În tot timpul existenței sale a fost nevoit să se menajeze, iar d-na Becquerel, cu care se căsătorise în 1921, a trebuit să vegheze permanent asupra sănătății lui.

Locuise mult timp la Paris într-un apartament mare și spațios din cartierul Champ-de-Mars. Avea aici o bibliotecă vastă pe care Antoine-César Becquerel o constituise și pe care descendenții

acestuia o îmbogăţiseră. Gustul pentru viaţa în aer liber, grija de sănătatea sa şi alte cauze mai fortuite l-au decis în 1923 să părăsească locuinţa pariziană şi să se instaleze cu soţia sa la Fontainebleau într-o vilă frumoasă şi mare unde şi-a putut transporta biblioteca, amintirile şi documentele. De atunci a locuit acolo în linişte şi totală independenţă. Acest lucru nu l-a împiedicat totuşi să participe la viaţa locală a frumosului oraş în care locuia. A ţinut acolo conferinţe ştiinţifice şi a prezidat unele ceremonii, ca, de pildă, distribuirile de premii. Îi plăcea să organizeze cu prieteni partide de vînătoare, cu deosebire în pădurea de la Othe.

Viaţa liniştită din Fontainebleau avea totuşi pentru el un inconvenient. Numeroasele obligaţii pe care le avea la Paris îi impuneau să facă foarte frecvent drumul de la Fontainebleau în capitală şi înapoi, drum care, cu calea ferată, dura aproape o oră; acest lucru nu ducea însă pentru el la o completă pierdere de timp, căci, ştiind să facă abstracţie de zgomotele exterioare, se obişnuise să lucreze în timpul mersului trenului.

În 1938, în cursul unei emoţionante ceremonii care a avut loc la Muzeul de istorie naturală, fusese aniversat centenarul creării catedrei de fizică din această mare instituţie. Au fost rostite frumoase alocuţiuni, mai ales de către confratele nostru André Léauté. Cariera şi opera celor patru Becquerel, care fuseseră succesiv titulari ai acestei catedre, a fost pe larg evocată şi această evocare a fost, desigur, foarte impresionantă pentru ultimul dintre ei, Jean Becquerel, care, cu această ocazie, a amintit el însuşi lucrările tatălui său. Zece ani mai tîrziu, în 1948, Jean Becquerel, în vîrstă de 70 de ani şi ajuns la pensionare, părăsea funcţiile sale de profesor la muzeu şi de examinator la Şcoala politehnică. A fost înlocuit în aceste două posturi de Yves Le Grand care, după pensionarea lui Louis Matout, îndeplinea de multă vreme la muzeu funcţia de asistent al lui Jean Becquerel.

Astfel, pentru prima oară după o sută zece ani, catedra de la muzeu înceta de a fi ocupată de un Becquerel.

În timpul celor cîțiva ani de pensionare, confratele nostru a dus o viață sedentară, însă mereu laborioasă. Dar puternice dureri în picioare îl făceau să sufere mult și îi limitau serios deplasările și activitatea.

Jean Becquerel avea în Bretania o a doua locuință, la Sainte-Marguerite, lîngă Pornichet. Era o vilă vastă, înconjurată de un parc împădurit. O botezase „Ar Bann", ceea ce în limba bretonă înseamnă „Razele", în amintirea marii descoperiri a tatălui său. În ultimii săi ani își prelungea șederile în acest loc care îi plăcea mult. Gusta dulceața climei oceanice de pe coasta atlantică a Bretaniei și găsea că iernile erau acolo mult mai puțin reci decît la Fontainebleau. Îi plăcea să stea și să viseze pe stîncile de la țărmul mării. Îi mai plăcea și să se plimbe în pădurile din jurul locuinței sale, simțindu-se complet la adăpost de vînturile din larg, deși le vedea agitînd, adesea violent, coroana arborilor, sus, deasupra capului său.

Iubea natura, avea simț artistic și era amator de opere de artă frumoase. Așa cum am arătat în legătură cu cartea sa despre acustică, era foarte muzical. Aprecia mult muzica religioasă și a avut tot timpul vieții sale, mai întîi la Fontainebleau și apoi în Bretania, o orgă la care cînta adeseori. Îi plăceau de asemenea călătoriile și, în afara deplasărilor de lucru în Olanda, a făcut adeseori călătorii în străinătate, mai ales în Elveția, în Oberlandul bernez și în Italia, pe malurile lacului Maggiore.

Domnilor,

Jean Becquerel a decedat în vila sa „Ar Bann" la 4 iulie 1953, la vîrsta de 75 de ani. A murit subit, de o criză cardiacă, ca și tatăl său. După ceremonia înmormîntării, care a avut loc în bisericuța din Pornichet, corpul său a fost transportat în Loiret la Châtillon, leagănul familiei sale, unde odihnește

acum alături de cele ale străbunicului Antoine-César, bunicului său Edmond și tatălui său Henri.

Municipalitatea din Fontainebleau a dat numele lui uneia din străzile orașului. Astfel va fi păstrată amintirea sa în locul unde atît de multă vreme a trăit și a muncit.

Văzută în perspectivă istorică, opera sa, a cărei amploare și bogăție am încercat să v-o arăt, ne apare astăzi ca strălucita și ultima înflorire a unei lungi descendențe de foarte mari fizicieni.

NOTĂ DESPRE VIAȚA ȘI OPERA LUI CAMILLE GUTTON

Citită în ședința anuală a premiilor Academiei de Științe din 13 decembrie 1965

Domnilor,

Întotdeauna este instructiv a studia apariția ideilor științifice noi și dezvoltarea aplicațiilor ce derivă din ele. Acest lucru este cu deosebire adevărat atunci cînd e vorba de undele hertziene și prodigioasele realizări tehnice care, la început mai încet, apoi din ce în ce mai rapid, au decurs de aici. Unul dintre cei care, în Franța, și-au consacrat întreaga viață — o viață de muncă și de cercetări — științei, pe atunci nouă, a radioelectricității, este regretatul nostru confrate, recent dispărut, Camille Gutton. Cariera sa științifică a fost o lungă cale rectilinie pe care a parcurs-o urmărindu-și munca cu tot atîta perseverență cîtă modestie, fără ca vreodată să-și cruțe eforturile. Aș dori să evoc în acest an în fața dumneavoastră viața și opera sa, dar mi se pare util ca mai întîi să spun cîteva cuvinte despre descoperirea undelor hertziene și despre primele lucrări pe care această descoperire le-a suscitat.

Concepția de undă electromagnetică a apărut în nemuritoarea operă teoretică a lui James Clerck Maxwell și anume în marea sa carte despre electricitate și magnetism publicată în 1873. Pornind de la ideea de a rezuma ansamblul fenomenelor electrice și magnetice într-un singur sistem de ecuații, celebrele ecuații ale lui Maxwell, marele

fizician englez, introducînd în formulele sale un termen suplimentar, pe care l-a desemnat atunci sub numele de „curent de deplasare", a sesizat posibilitatea de a considera lumina ca pe o perturbare electromagnetică ce se propagă în spațiu. El readucea astfel, printr-o intuiție genială, întreaga optică în cadrul teoriei generale a electricității și magnetismului. Se știe însă că radiațiile luminoase, chiar atunci cînd se încorporează în ele radiațiile infraroșii și ultraviolete, nu corespund decît unui interval de frecvență destul de limitat. Se naște atunci de la sine ideea că prin mijloace electrice apropriate trebuie să se poată obține emisia de radiații electromagnetice avînd frecvențe mai mici decît acelea ale luminii (cazul undelor hertziene) sau chiar mai mari (cazul razelor X și γ).

Abia în 1888 Heinrich Hertz a putut obține, cu ajutorul dispozitivului simplu cunoscut sub numele de excitatorul lui Hertz, unde electromagnetice de foarte înaltă frecvență, a căror lungime de undă era abia de ordinul a cîțiva centimetri. Hertz studiase și aprofundase opera lui Maxwell, mort în 1879, și acest lucru l-a condus la descoperirea existenței undelor care îi poartă numele. Descoperirea lui Hertz a avut un mare răsunet și, după moartea prematură a tînărului savant german în 1894, un mare număr de fizicieni s-au apucat să studieze proprietățile noilor radiații. Printre aceștia trebuie citați Blondlot în Franța, Righi în Italia, Sarrazin și de La Rive în Elveția. Henri Poincaré, care nu ezita să aplice puternicele sale aptitudini matematice la studiul fenomenelor fizice, a consacrat proprietăților noilor radiații numeroase lucrări și, în special, cursul pe care l-a publicat în 1894 sub titlul *Les Oscillations électriques*. În acest domeniu însă progresele au fost lente: dispozitivele experimentale erau încă rudimentare, procedeele de măsurare imperfecte și previziunea fenomenelor era dificilă prin faptul că puțini fizicieni cunoșteau atunci teoria lui Maxwell și știau să folosească ecuațiile sale. În acest climat de cercetări, încă destul de puțin favorabil, Camille Gutton avea să

începă primele sale lucrări, după cum vom vedea îndată.

Camille Gutton s-a născut la Nancy la 30 august 1872, cu puțin timp înainte ca orașul său natal să fie eliberat de sub ocupația germană care a urmat războiului din 1870. Tatăl său, avocat la Curtea de Apel, a avut cinci copii, el fiind cel mai mare. Bunicul său dinspre mamă era profesor de chimie la Facultatea de Științe din Nancy și a contribuit la orientarea nepotului său spre o carieră științifică. Acesta și-a făcut studiile la liceul din Nancy unde a pregătit bacalaureatul în latină-greacă și unde a avut un excelent profesor, Collignon, căruia îi datora marea sa ușurință de a-și exprima clar și corect ideile. Primit în 1892 la Școala normală superioară, el intră aici cu un an mai tîrziu, după ce făcuse serviciul militar într-un regiment de infanterie din marele oraș loren. Astfel, și-a petrecut toată adolescența într-o familie foarte unită, mergînd în vacanțe la Gérardmer cu rude și prieteni și antrenîndu-se la mersul pe jos, acest sport atît de natural și atît de ades neglijat de tineretul de astăzi, ceea ce a contribuit la a-i asigura o sănătate excelentă și o mare rezistență la oboseală.

Anii de studii la Școala normală au fost pentru el o perioadă fericită și profitabilă din viața sa, perioadă în care a avut excelenți camarazi și în special pe foștii noștri confrați Jean Perrin și Paul Langevin. A ieșit de aici ca agregat în fizică, apoi, puțin doritor de a rămîne la Paris, a refuzat un post de asistent, preferînd să se înapoieze la Nancy.

Reîntors în orașul său natal, intră la laboratorul lui Blondlot, căruia îi va fi de atunci elev și, în curînd, emul. Aici pregătește o importantă teză de doctorat pe care o susține în 1899 și își continuă cu strălucire lucrările în aceeași direcție. Conferențiar la Facultatea de Științe în 1902, devine profesor de fizică în 1906: ține aici cursuri de pregătire pentru licență și predă de asemenea la Insti-

tutul de Electrotehnică, atunci înființat în acest oraș. Acest curs la Institutul de Electrotehnică l-a orientat către aplicații și l-a ajutat să dobîndească, alături de calitățile unui om de știință, pe acelea ale unui inginer. Cursurile sale erau întotdeauna perfect clare și riguroase și i-au dat ocazia să redacteze un tratat intitulat *Génératrices de courant et moteurs électriques*. Din 1909 pînă în 1914 a putut relua lucrările de laborator, privind în special viteza luminii și undele hertziene. Vom avea îndată ocazia să examinăm această primă parte a operei sale.

Războiul din 1914 a adus în viața sa, ca și în aceea a tuturor contemporanilor săi, o perturbare profundă. Constrîns la începutul mobilizării la lucrări deloc demne de eminentul fizician care era deja, Gutton a fost chemat să vină, în condiții pe care le voi aminti, să colaboreze la Paris cu generalul Ferrié și astfel a putut juca în tot restul războiului un rol foarte important în progresele, pe atunci atît de rapide și decisive, ale radiocomunicațiilor hertziene.

Devenit astfel unul dintre pionierii aplicațiilor undelor hertziene și ai electronicii în telecomunicații, el este demobilizat în 1918 și se înapoiază la Nancy, unde își reia cursurile și lucrările, venind totodată în fiecare săptămînă la Paris spre a-și ține cursurile la Școala superioară de Electricitate și la Școlile superioare a Aeronauticii și a P.T.T. și asigurînd controlul construcției marilor posturi moderne de radiodifuziune. Tot în aceeași perioadă studiază și pune la punct, fie singur, fie cu diferiți colaboratori, procedee noi de emisie de unde întreținute de foarte scurtă lungime de undă. Și în acest domeniu, Gutton, cu o uimitoare previziune a viitoarelor progrese ale tehnicii, face operă de pionier.

În 1930, părăsind cu regret orașul Nancy, unde se născuse și făcuse aproape întreaga sa carieră, vine la Paris să preia conducerea Laboratorului național de radioelectricitate, unde îndeplinește de asemenea o operă importantă, după cum vom

vedea mai departe. În 1938 se pensionează și, fără a-și înceta activitatea, se retrage din viața publică.

Înaltele sale merite i-au atras numeroase distincții. Academia de Științe, care îi atribuise premiul Henri Becquerel în 1918 și premiul Kastner—Boursault în 1922, îl alesese membru corespondent al secției sale de fizică în 1928. Fusese de asemenea numit membru corespondent al Biroului de longitudini în 1933. În 1938, devine membru liber al Academiei de Științe. Era comandor al Legiunii de onoare.

Aceasta a fost, foarte rapid rezumată, cariera regretatului nostru confrate, iar acum trebuie să studiem, mai aprofundat, diferitele părți ale unei opere care a contribuit într-un mod atît de important la dezvoltarea cunoștințelor noastre despre undele hertziene și aplicațiile lor.

*

* *

Opera lui Camille Gutton poate fi ușor împărțită în trei părți foarte distincte, corespunzînd la trei perioade succesive din viața sa. Prima, care se întinde din 1896 pînă în 1914, este aceea în care a executat la Nancy importante și minuțioase lucrări asupra proprietăților undelor hertziene și asupra aplicațiilor acestor proprietăți la rezolvarea unor probleme de interes pur științific. Apoi, din 1915 pînă în 1919, în cadrul radiotelegrafiei militare, sub conducerea generalului Ferrié, folosește profundele cunoștințe științifice și tehnice pe care le poseda în domeniul electricității la studierea proprietăților lămpilor triode, la perfecționarea utilizării lor pentru radiocomunicații, în special în aviație, și la efectuarea primelor realizări în radiotelefonie făcute în Franța, lucrări care, cîțiva ani mai tîrziu, urmau să facă posibilă dezvoltarea radiodifuziunii. În sfîrșit, din 1919 pînă la pensionarea sa, odată cu reluarea diferitelor cercetări de laborator la Nancy și apoi cu conducerea Laboratorului național de radioelectricitate, el a realizat primele

emisiuni de unde întreţinute pe frecvenţe foarte înalte, dovedindu-se astfel precursorul prevăzător al uneia din ramurile cele mai importante ale tehnicii radioelectrice contemporane.

În 1896, cînd revenit la Nancy după absolvirea Şcolii normale, Gutton începe să lucreze cu Blondlot, care tocmai măsurase viteza de propagare a undelor hertziene şi demonstrase experimental că ea este egală cu viteza luminii, ceea ce confirma validitatea ideilor lui Maxwell. Viitorul nostru confrate începe atunci cercetări cu privire la forma cîmpului electromagnetic în vecinătatea unui rezonator Hertz. El studiază transmiterea undelor de la un conductor la altul atunci cînd între cei doi conductori nu există legătură metalică. Descurcînd cu abilitate o problemă foarte complexă, neavînd la dispoziţie decît mijloace încă foarte rudimentare, el arată cum se operează reflexia unei părţi din fluxul de energie către firul primar şi transmisia celeilalte părţi la firul secundar şi reuşeşte să precizeze relaţiile de fază şi de intensitate între undele incidente şi undele transmise. Aceste rezultate au format obiectul tezei sale de doctorat în 1899.

Gutton abordează apoi studiul propagării undelor în medii dielectrice cu scopul de a stabili cu mai multă precizie decît putuseră s-o facă Sarrazin şi de La Rive egalitatea vitezelor de propagare de-a lungul firelor şi în mediul dielectric. A ajuns astfel să facă constatări precise asupra vitezei undelor hertziene în aer şi în medii cu o mare constantă dielectrică cum sînt bitumul şi gheaţa. Experienţe ingenioase în care făcea să se interfereze două sisteme de unde, dintre care unul se propaga plecînd de la oscilator de-a lungul unei linii metalice, iar celălalt efectua un traseu în aer între două oglinzi parabolice, i-au permis să stabilească că pentru fire de cupru de un milimetru diametru şi lungimi de unde inferioare unui metru viteza de propagare a undelor de-a lungul firelor diferea cu mai puţin de 1/200 de viteza undelor plane. Experimentator foarte ingenios, a reluat apoi aceeaşi problemă, cu şi mai multă precizie, utili-

zînd fenomenul birefringenței electrice în sulfura de carbon, aranjîndu-se astfel încît să poată constata incidența simultană pe o celulă Kerr a luminii emise de o scînteie și a oscilațiilor electrice care încărcau condensatorul celulei. El a reușit astfel să arate că între viteza luminii și aceea a undelor hertziene amortizate care se propagă pe un fir există o foarte mică diferență, care este funcție de lungimea de undă, de rezistența electrică a firelor și de diametrul lor.

Camille Gutton a consacrat de asemenea cercetări pentru studierea — așa cum am amintit mai sus — a propagării undelor hertziene în gheață în vederea determinării constantei dielectrice a acestui solid pentru frecvența deja foarte ridicată care corespundea la 25 cm lungime de undă. El a aflat o valoare foarte diferită de aceea pe care o măsurase Blondlot pentru undele de zece metri lungime de undă, dar a putut explica acest fapt arătînd că constanta dielectrică a gheții variază de la 3 la 2 atunci cînd lungimea de undă crește de la 25 centimetri la 12 metri.

Despre aceste experiențe ale lui Gutton pe gheață se povestește o anecdotă amuzantă. Le-a efectuat în timpul unei ierni foarte reci cu ajutorul gheții culese dintr-un eleșteu din împrejurimile orașului Nancy, dar, cum orice început de topire a gheții trebuia evitat, a fost nevoit, cu toată asprimea temperaturii, să-și continue experiențele într-un laborator neîncălzit și cu toate ferestrele deschise. Ceea ce ne arată cum oamenii pasionați de cercetare știu la nevoie să se supună unor încercări pe care le consideră necesare pentru succesul lucrărilor lor.

Căutînd să determine drumul parcurs de undele hertziene de-a lungul unui fir într-un timp dat, se poate ajunge la măsurarea foarte precisă a acestui timp. Gutton a făcut două aplicații interesante ale acestei idei comparînd viteza luminii în aer și în medii refringente dispersive și determinînd durata de stabilire a birefringenței electrice în di-

ferite lichide. Rezultatul acestor experiențe a fost următorul: pentru radiațiile spectrului vizibil ce pot fi foarte puternic refractate raportul vitezelor în aer și în lichid este mult superior indicelui de refracție. Era prima verificare directă a teoriei vitezei de grup, iar celebra formulă datorată lordului Rayleigh și lui Gouy, care dă raportul între viteza de grup și viteza de fază, a fost verificată exact de frumoasele experiențe ale lui Gutton.

În sfîrșit, experiențe foarte iscusite privind durata de stabilire a birefringenței electrice i-au permis să măsoare timpi de ordinul timpului de relaxare al lui Maxwell și să verifice că acești timpi sînt cu atît mai lungi cu cît constanta lui Kerr este mai mică.

Acestea au fost principalele lucrări efectuate de Gutton asupra undelor hertziene în prima parte a carierei sale. Măsurătorile pe care le-a efectuat cu o mare precizie, cu tot caracterul încă foarte imperfect al mijloacelor de care dispunea, arătau deja ingeniozitatea de spirit, profundele cunoștințe teoretice și marea abilitate experimentală a acestui eminent fizician. Ele au fost toate executate cu unde hertziene amortizate, furnizate de oscilatoarele de care dispunea. Se apropia însă momentul cînd folosirea lămpilor triode urma să-l determine să nu mai folosească decît unde întreținute, ceea ce ne determină în mod firesc să studiem acum orientarea nouă pe care războiul din 1914 avea s-o imprime lucrărilor sale.

Cînd a izbucnit războiul din 1914, regulile de mobilizare nu țineau deloc seama de competențe și de situații. Camille Gutton, avînd vîrsta de 42 de ani, făcea parte din rezerva teritorială, iar faptul că era un savant eminent și profesor la facultate nu intervenea în repartizarea sa: a fost mobilizat ca genist și însărcinat să participe la lucrările de electrificare din garnizoana Toul, unde a avut de efectuat munci de tăietor de lemne și de terasier. Totdeauna conștiincios în muncă, s-a achitat fără neplăcere de aceste sarcini. Din fericire, co-

mandantul garnizoanei din Toul era un eminent inginer în domeniul telegrafiei, maiorul Pomey, care și-a lăsat el însuși numele ca fizician. El a dispus repartizarea genistului Gutton la postul de T.F.F. din Toul, unde confratele nostru s-a familiarizat cu practica radioului și a învățat să citească după sunet, ceea ce i-a fost foarte util mai tîrziu. În cursul unei inspecții, un general a observat că Gutton era profesor universitar, l-a numit caporal și l-a repartizat ca magazioner la depozitul regimentului său. Din fericire, în septembrie 1915, depozitul său este întrebat dacă nu dispune cumva de un profesor de fizică susceptibil de a fi repartizat la Centrul de telegrafie militară și atunci Gutton vine la Paris să lucreze sub ordinele generalului Ferrié. Dar cum nu era decît caporal, a trebuit să îndeplinească un timp funcția de șef de dormitor într-o cazarmă pariziană și să vegheze ca soldații să se înapoieze seara la vreme. Era un rol care nu-i convenea deloc și autorul notei de față, care a făcut atunci cunoștință cu el la postul de la turnul Eiffel, își amintește de conversațiile amuzante pe care le-a avut cu el pe această temă. Curînd însă această situație a luat sfîrșit, el a fost numit sublocotenent cu titlu temporar și astfel a avut, în sfîrșit, o situație militară întrucîtva demnă de el.

Cînd Camille Gutton a fost repartizat la Centrul de telegrafie militară, aplicațiile undelor hertziene la telecomunicații prin radio erau în plină dezvoltare. De vreo cincisprezece ani, cu o perseverență pe care n-au putut-o obosi nici lipsa de înțelegere, nici încetineala birocratică, un tînăr ofițer de geniu, Gustave Ferrié, care a fost mai tîrziu unul din cei mai iluștri membri ai confreriei noastre, își asumase sarcina de a dota armata franceză cu comunicații radiotelegrafice. Întrunind calitățile unui șef, ale unui mare animator, ale unui om de știință și ale unui tehnician de valoare, el dotase puțin cîte puțin armata cu posturi fixe și mobile din ce în ce mai importante: în special postul de la turnul Eiffel, pe care îl dezvoltase și

îl echipase treptat, era, în ajunul primului război mondial, în situația de a juca rolul important pe care l-a deținut efectiv. Dar tehnica radioelectrică, cu toate progresele rapide, era atunci încă aproape în faza copilăriei. Posturile de emisie erau echipate cu un material greu, dinamuri și alternatori care permiteau ca, prin descărcarea unui condensator printr-un eclator, să se obțină emisia de unde hertziene amortizate, de mare lungime de undă. Numai posturile cu arcuri, puțin numeroase încă, permiteau să se emită, în condiții destul de proaste, unde întreținute. Recepția se făcea cu ajutorul unor detectori cu galenă de o mare instabilitate și fără nici un procedeu de amplificare: astfel, „cititorii de sunet" trebuiau să poarte o cască aplicînd receptoare pe urechi și chiar celor mai buni dintre ei le era greu să perceapă slabele semnale Morse care le parveneau cu o intensitate foarte variabilă însoțite de paraziți și de defecte ale detectoarelor.

Situația s-a modificat considerabil atunci cînd, la începutul războiului, colonelul Ferrié și-a putut procura cîteva exemplare de lămpi cu trei electrozi sau triode care, realizate cu cîțiva ani înainte de Lee de Forest, începeau a fi utilizate în Statele Unite. Proprietățile admirabile ale acestor lămpi, care permiteau ca ele să fie folosite, cu suplețe și precizie, pentru detectare, amplificare și chiar emisie, îl frapaseră imediat și profund pe Ferrié: în plin război, îndată după bătălia de la Marna, el obține demobilizarea unor tehnicieni specializați de la firma Grammont din Lyon și, începînd de la sfîrșitul anului 1914, fabricarea în serie a lămpilor triode pentru telegrafia militară este asigurată, iar în toate serviciile care depind de Ferrié se studiază cu ardoare proprietățile și aplicațiile acestor lămpi minunate.

Gutton sosește la Centrul de telegrafie în perioada în care tehnica lămpilor triode era în plină dezvoltare. Grație vastelor sale cunoștințe științifice și tehnice, izbutește foarte repede să domine toate problemele pe care le punea pe atunci folosirea triodelor. Începînd de la sfîrșitul anului 1916,

este însărcinat în mod special de Ferrié să construiască, pentru nevoile armatei, posturi de emisie și de recepție pentru unde întreținute, echipate cu lămpi, și reușește foarte repede să pună la punct posturi de acest gen de mică putere, emițînd pe unde de 300 pînă la 600 m lungime de undă, posturi care, intrate curînd în producție de serie la Societatea de Contoare, au fost rapid puse în funcțiune pe front. Gutton a mai primit sarcina specială de a studia și de a pune la punct posturi cu lămpi pentru aviație și astfel a ajuns să realizeze, prin modularea undelor întreținute emise, comunicații telefonice prin unde hertziene, efectuînd pentru prima oară în Franța, cred, un mod de radiocomunicație care avea să cunoască mai tîrziu o dezvoltare prodigioasă. El a putut astfel stabili comunicații telefonice între două avioane și între un avion și sol. Cu privire la această chestiune a scris el însuși următoarele: „În 1916, la Douaumont, în timpul bătăliei de la Verdun, a fost efectuată o primă încercare între un avion și sol. Dar abia în 1917 la Villacoublay am putut noi, pentru prima oară în lume, să stabilim o conversație între avioane, în pofida problemelor care se puneau în acea vreme: zgomote de motoare, paraziți, lipsă de confort...". El a condus personal fabricarea acestor posturi, făcînd astfel muncă de inginer în contact direct cu atelierele de fabricație și aceste posturi au fost adoptate de către armatele aliate engleze și americane. Vedem așadar cît de importantă a fost în acea epocă opera realizată în cîțiva ani de regretatul nostru confrate.

În acea perioadă a vieții sale, și spre a supune la probe posturile pe care le pusese la punct, Gutton a trebuit să execute numeroase zboruri în avion în condiții adeseori periculoase, căci aviația din acel timp nu era încă prea sigură de sine. În cursul acestor zboruri a avut de suferit mai multe pene și într-o zi, în largul portului Dunkerque, o pană de hidroavion l-a silit să rămînă cîteva ore în derivă pe mare așteptînd sosirea de ajutoare. A suportat toate aceste incidente cu curaj și cu

zîmbetul pe buze, iar atunci cînd unii tineri piloți, spre a-și arăta priceperea, îl supuneau la proba unei coborîri bruște în vrilă, se mulțumea să zîmbească spunîndu-le că făcuse acest gen de experiență.

Reluîndu-și apoi, în uniformă militară, rolul de profesor, Gutton a ținut la Plessis-Belleville cursuri despre lampa cu trei electrozi ofițerilor aliați însărcinați cu transmisiunile, dintre care mulți erau eminenți fizicieni sau ingineri specialiști în radiocomunicații. Aceste cursuri au fost publicate într-o notă secretă rezervată armatei, apoi, minuțios revăzute, i-au servit lui Gutton ca bază pentru redactarea unui mic volum din colecția Armand Colin, despre care voi vorbi îndată.

În timpul anilor petrecuți la telegrafia militară, confratele nostru a legat o prietenie solidă cu generalul Ferrié care, știind să judece bine oamenii și capacitatea lor, sesizase repede excepționala valoare a noului său colaborator. Totuși, aveau uneori mici discuții și se povestește că într-o zi, cînd Gutton realizase prin intuiție un montaj a cărui funcționare nu putuse s-o justifice imediat, Ferrié i-a spus că nu-i decît un biet meșteșugar. A fost însă unul din acei mici nori care nu întunecă multă vreme cerul luminos al prieteniei.

Armistițiul din 1918 l-a readus pe Gutton în viața civilă, unde și-a reluat funcțiile la Facultatea de Științe din Nancy. Revenea aici după ce își lărgise considerabil cunoștințele, căci, înainte de război, toate lucrările sale personale erau aproape exclusiv de ordin pur științific și urmăreau proprietățile și utilizarea, în diverse experiențe, a undelor hertziene amortizate, furnizate de oscilatorii lui Hertz. Dar după aceea, el a dobîndit o mare practică în comunicațiile radiotelegrafice și radiotelefonice, a studiat aprofundat proprietățile lămpilor triode și a fost un pionier în domeniul foarte vast al aplicațiilor pe care utilizarea acestor lămpi îl deschisese brusc. A continuat să se preocupe de

aceste probleme, și laboratorul său din Nancy a devenit foarte curînd un centru important de cercetări asupra tuturor aplicațiilor undelor hertziene.

Atunci și-a îndreptat atenția asupra unei chestiuni spre care succesiunea cercetărilor sale părea să-l fi adus de la sine să o studieze. Toate experiențele pe care le făcuse înainte de război se axaseră pe undele hertziene amortizate cu foarte scurte lungimi de undă, tocmai acelea pe care le descoperise Hertz. Apoi se familiarizase cu undele întreținute furnizate de emițători cu triode pe lungimile de undă mult mai mari pe care le utiliza atunci telegrafia fără fir. Desigur, și-a pus problema de a afla dacă nu s-ar putea obține cu emițători cu lampă unde întreținute de foarte scurtă lungime de undă, care să-i permită a relua cu mult mai multă claritate genul de experiențe pe care le făcuse altădată cu oscilatori Hertz și care să deschidă posibilități cu totul noi comunicațiilor prin radio.

Era o idee total opusă acelora care domneau atunci în tehnica telecomunicațiilor hertziene. Această tehnică, sub influența unei analize incomplete a condițiilor de propagare a undelor electromagnetice în jurul pămîntului, se orientase treptat, la începuturile ei, spre folosirea exclusivă a undelor lungi, cu lungimi de undă superioare unui kilometru, și spre sfîrșitul războiului noile posturi de emisiune, pe atunci în construcție, erau înzestrate cu enorme antene cu rețea și prevăzute spre a radia unde de cîțiva kilometri. În anii care au urmat războiului, s-a produs o reacție atunci cînd s-a observat că undele medii și scurte, ale căror lungimi de undă se întind de la cîțiva decimetri pînă la cîteva sute de metri, se propagă cu multă ușurință la suprafața pămîntului și pot atinge distanțe importante. În acea epocă, în care radiodifuziunea telefonică începea să ia extindere, Gutton, însărcinat, așa cum am spus, să participe la controlul construcției de noi posturi de radiodifuziune, putea urmări îndeaproape toată această evoluție

a tehnicii, fapt ce avea să-i sugereze ideea că un foarte frumos viitor putea fi rezervat utilizării de unde întreținute de lungimi de undă mult mai scurte, de ordinul unui metru sau centimetru, obținute prin emițătorii cu triodă. Confratele nostru s-a arătat astfel un foarte perspicace precursor al acestei „curse spre hiperfrecvențe" care caracterizează de treizeci de ani noua orientare a tehnicii radioelectrice.

De la început însă grave dificultăți se opuneau punerii în practică a unei astfel de încercări. Aparatele de transmisie și de recepție folosite în acea vreme cuprindeau întotdeauna, în afara lămpilor triode, circuite oscilante comportînd selfuri și capacități acordate pe lungimea de undă de emis sau de recepționat. Or, pentru lungimi de undă foarte scurte, selfurile și capacitățile trebuie să fie atît de mici, încît sînt foarte greu de realizat. În plus, buna funcționare a lămpilor triode cere ca durata traseului electronilor de la catodul cald care le emite pînă la anodul care le recepționează (ceea ce se numește „timpul de tranzit") să fie mică față de perioada undei. Or, pentru lungimi de undă foarte scurte, frecvența devine foarte ridicată și perioada foarte mică. Pentru lungimi de undă din ce în ce mai scurte, triodele funcționează din ce în ce mai rău și sfîrșesc prin a nu mai funcționa deloc.

Gutton, care cunoștea perfect toate aceste probleme, s-a străduit să învingă aceste dificultăți. A fost ajutat, desigur, de lunga sa practică cu oscilatorii lui Hertz, care constituie în realitate circuite oscilante foarte rudimentare la care self-inducția și capacitatea sînt reduse la expresiile lor cele mai simple. El a realizat circuite oscilante în care capacitatea se reducea la aceea a lămpii înseși intercalate în ele, self-inducția fiind constituită de o simplă buclă de fir care leagă grila și placa lămpii.

În aceeași ordine de idei, el a încercat, pentru a reduce lungimea de undă, să utilizeze armonicele în circuite distincte. A executat această operație

cu Pierret, pe atunci asistent la Facultatea de Ştiinţe din Nancy. Tot lui Pierret i-a propus să studieze constanta dielectrică şi dispersia lichidelor polare pentru frecvenţe de ordinul acelora al oscilaţiilor moleculare şi astfel au ajuns să studieze împreună oscilatorii cu unde foarte scurte pe care îi descoperise recent Barkhausen.

Oscilatorul lui Barkhausen este constituit dintr-o lampă triodă pe care nu se aplică o tensiune mică între catod şi grilă şi o tensiune mare între catod şi placă, ci, dimpotrivă, o tensiune puternică între catod şi grilă şi o tensiune mică între catod şi placă. Astfel funcţionarea lămpii este, firesc, profund modificată, iar electronii, în loc să pornească direct de la catod la placă, încep să oscileze în jurul grilei cu o frecvenţă ridicată, ceea ce permite obţinerea unor unde a căror lungime de undă poate să coboare pînă la vreo cincizeci de centimetri. Diferiţi fizicieni reuşiseră să perfecţioneze dispozitivul lui Barkhausen făcîndu-l mai simetric. Printr-o modificare ingenioasă, care permitea dublarea frecvenţei undelor obţinute cu montajul iniţial al lui Barkhausen, Pierret a reuşit să întreţină oscilaţii a căror lungime de undă nu mai era decît de optsprezece centimetri. Aşezînd o antenă foarte mică în focarul unei oglinzi cilindrico-parabolice, Gutton şi Pierret au obţinut un fascicul de raze paralele al acestor unde foarte scurte şi au putut realiza cu unde de optsprezece centimetri legături telefonice la o distanţă de cîţiva kilometri. Inspirîndu-se din aceste cercetări, societatea „Le Matériel téléphonique“ a reuşit să realizeze o instalaţie de intercomunicaţii între aerodromurile francez şi englez, de o parte şi de alta a strîmtorii Calais.

Cu ajutorul acestor unde întreţinute foarte scurte, Camille Gutton şi colaboratorii săi, în special Beauvais, au reuşit să studieze fenomenele de reflexie, refracţie, polarizare şi schimbare de fază pe care le prezintă ele şi aceasta cu mult mai multă uşurinţă şi precizie decît ar fi putut-o permite folosirea

undelor amortizate de frecvență analogă, furnizate de oscilatorii lui Hertz.

Desigur, aceste prime dispozitive pentru emisia și recepția undelor foarte scurte erau încă foarte imperfecte și nu permiteau să se obțină decît puteri foarte slabe. Cu toate acestea, ca adevărat precursor în materie, Camille Gutton deschisese astfel calea extraordinarelor realizări pe care le-a înregistrat de vreo treizeci de ani încoace tehnica hiperfrecvențelor. Trebuie să aducem omagii lucrărilor sale și în legătură cu această problemă.

Atît la Facultatea de Științe din Nancy, cît și, ceva mai tîrziu, la Laboratorul național de radioelectricitate, Gutton a condus cercetările colaboratorilor săi participînd el însuși activ la ele. A efectuat personal lucrări asupra armonicelor oscilatorilor, asupra descărcărilor la înaltă frecvență și asupra proprietăților dielectrice ale gazelor ionizate în cîmpuri de înaltă frecvență. A pus la punct împreună cu Laville un electrometru sensibil pentru măsurarea diferențelor de potențial alternative, cu aplicație la măsurarea constantelor aparatelor telefonice. A publicat un studiu al regimului instabil al releelor amplificatoare, a condus o lucrare a lui Riéty asupra curenților de diafragmă și o alta a lui Detrait asupra frecării lichidelor de-a lungul unui perete, a construit o balanță de inducție pentru căutarea obuzelor îngropate. Sub directivele sale, Laville a studiat propagarea undelor scurte de-a lungul firelor, d-ra Chenot — propagarea descărcărilor la înaltă frecvență în tuburile conținînd un gaz rarefiat, Beauvais — reflexia undelor electromagnetice și Michel — permeabilitatea fierului la frecvențe ridicate.

O mențiune specială trebuie făcută cu privire la lucrările asupra proprietăților gazelor ionizate, efectuate sub conducerea sa de către fiul său, Henri Gutton. Aceste lucrări au pus în evidență rezonanțele plasmelor ionizate și dedublarea lor prin acțiunea unui cîmp magnetic, inaugurînd astfel un gen de cercetări care ocupă un loc foarte

mare în fizica de azi. Această colaborare a lui Camille Gutton cu fiul său urma dealtfel să se prelungească ulterior ani îndelungați, în special în domeniul studiului undelor foarte scurte și al aplicațiilor lor.

Am arătat că în 1930 confratele nostru, părăsind Facultatea de Științe din Nancy, vine să preia conducerea Laboratorului național de radioelectricitate. Generalul Ferrié reunise în jurul său, la Centrul de telegrafie militară, o întreagă echipă de cercetători remarcabili, specialiști în radioelectricitate. Doritor de a asigura permanența acestui centru de cercetări, el a obținut ca acest organism pur militar să ia denumirea de Laborator național de radioelectricitate și, devenit civil, să fie atașat Ministerului Poștelor, Telegrafului și Telefoanelor, sub conducerea lui Gutton. Astfel transformat, acest laborator nu putea rămîne la infinit în baracamentele Telegrafiei militare, unde fusese inițial instalat, și Camille Gutton a trebuit să înfrunte dificila sarcină de a-l reinstala în localuri mult mai vaste și mai bine aranjate: el s-a consacrat acestei sarcini cu conștiința și ardoarea pe care o aducea în executarea tuturor îndatoririlor sale. Noul laborator a intrat în construcție în 1936 la Bagneux, la doi kilometri de poarta Orléans, și, începînd din anul următor, a putut să intre în funcțiune.

În noul gen de muncă pe care Gutton l-a avut de îndeplinit în acea epocă, metodele precise de măsurat jucau un rol important. A trebuit să pună la punct metodele de măsurat frecvențe, inductanțe, capacități și rezistențe. A trebuit de asemenea să perfecționeze verificarea receptorilor, studiul paraziților, al tuburilor electronice, precum și încercarea izolatorilor întrebuințați în înaltă frecvență.

Sub îndrumarea sa au mai fost efectuate și alte cercetări, printre care cele mai importante sînt acelea care se referă la propagarea undelor hertziene în special în straturile înalte ale atmosferei. În acest fel au fost puse în evidență, pentru prima

oară în mod precis, perturbările pe are le exercită unele fenomene solare asupra propagării undelor hertziene în jurul pămîntului. Acest gen de cercetări a luat astăzi o mare extindere, dar munca efectuată sub îndrumarea lui Gutton la Laboratorul național de radioelectricitate încă la începuturile lui a contribuit mult grabnica lui dezvoltare.

Am văzut deja rolul important pe care l-a jucat Camille Gutton la Nancy, ca profesor de fizică și de electrotehnică la Facultatea de Științe și la Institutul de Electrotehnică. Mai tîrziu, cînd devenise un mare specialist în lămpi triode și în comunicații radioelectrice, a ținut în legătură cu aceste subiecte importante cursuri la Școala superioară de electricitate, la Școala superioară de P.T.T. și la Școala națională de aeronautică. Dar dacă, spre cel mai mare profit al elevilor și al auditorilor săi, și-a răspîndit cunoștințele prin cuvînt, el a și scris numeroase și importante lucrări. Am citat deja cartea sa *Génératrices de courant et moteurs électriques* scrisă la Nancy în epoca în care preda aici electrotehnica. În timpul șederii sale la Centrul de telegrafie militară în cursul războiului din 1914, el a expus cercetările sale asupra lămpilor triode într-o mică notă rezervată militarilor, pe care îmi amintesc a o fi consultat cu mult folos. Atent revăzută, această notă a fost ulterior publicată în colecția Armand Colin sub titlul *Télégraphie et Téléphonie sans fil* și această mică lucrare, reeditată de mai multe ori cu completări, a adus cele mai mari servicii acelora care, în epoca aceea, voiau să se inițieze în aceste probleme și poate fi și astăzi consultată cu folos. O lucrare oarecum analoagă a fost editată, apoi reeditată, în colecția de Conferințe-Rapoarte de către Presses universitaires sub titlul *La Lampe à trois électrodes*. Trebuie să mai cităm, printre alte opere ale lui Gutton, un tratat de radioelectricitate generală, publicat de Baillière, *Leçons de Radioélectricité*, apărute la Eyrolles, și un fascicul din *Mémorial des Sciences physiques*,

editat de Gauthier-Villars și consacrat „Liniilor telefonice". Toate aceste lucrări, clare și profunde totodată, sînt de o înaltă calitate.

*

* *

Cîțiva ani după pensionarea lui Gutton, jubileul său științific a fost celebrat într-o ședință ținută la Ministerul Poștelor, Telegrafului și Telefoanelor, la 10 iunie 1944, într-un moment deosebit de dramatic din istoria noastră. Au fost pronunțate numeroase discursuri și s-a făcut elogiul marelui savant, al eminentului tehnician, al omului de bine care era confratele nostru. El a răspuns printr-o scurtă alocuțiune, simplă și emoționantă.

În ultima parte a vieții sale a continuat să lucreze în liniște, dar întotdeauna cu ardoare. Niciodată n-a încetat să se intereseze de problemele care fuseseră obiectul studiilor sale. A urmărit întotdeauna uimitoarele progrese ale tehnicilor radioelectrice și electronice și în special dezvoltarea utilizării undelor foarte scurte, a acestei „curse către hiperfrecvențe" printre ai cărei precursori se număra. Cu o lună înaintea morții sale, bolnav și la o vîrstă înaintată, se interesa încă de invenția laserilor.

Regretatul nostru confrate se căsătorise în 1901 și avusese trei copii, o fiică și doi fii. Am amintit deja strînsa colaborare cu fiul său Henri pe planul lucrărilor lor științifice și tehnice, colaborare care s-a prelungit pînă la sfîrșitul vieții sale. Printr-o curioasă coincidență, nepotul său, André Gutton, în calitatea sa de arhitect-șef al clădirilor civile și al palatelor naționale, este însărcinat de cîțiva ani cu întreținerea palatului Institutului și el este acela care a efectuat recent, cu succesul pe care îl puteți constata privind în jurul dumneavoastră, refacerea acestei celebre săli a Cupolei, în care ne aflăm în momentul de față.

Viața de familie a lui Camille Gutton a fost exemplară. Era iubit de toți și cu deosebire de copiii și nepoții săi, cărora îi plăcea să le povestească experiențele vieții sale. Extrem de muncitor, consacra

studiului o mare parte din timpul său; dar se odihnea cu plăcere, mai ales ascultînd muzică; era el însuși pianist și îi plăcea să cînte la pian în tovărășia soției sale și a copiilor săi. Era de o mare bunătate și de o mare simplitate și îi plăcea să aducă servicii ori de cîte ori avea ocazie. Toți cei care au avut privilegiul să-i fie aproape au păstrat amintirea extremei sale afabilități.

Dar anii treceau. Puțin cîte puțin Camille Gutton intra în ceea ce Daniel Halévy, folosind o expresie emoționantă, a numit „tăcerea vîrstelor înaintate". Bătrînețea lui a fost senină: era seara unei zile frumoase. Rămînea tot mai mult la proprietatea sa din Saint-Nom-la-Bretèche, aproape de pădurea din Marly. Ca înțelepții din toate timpurile, își cultiva acolo grădina și îi plăcea să spună confraților de la Academie cîtă plăcere îi procura această ocupație liniștită. În cele din urmă sănătatea sa începu să se altereze: avea arterioscleroză, ceea ce îl făcea să sufere mult. Nu mai putea veni decît rareori la ședințele Academiei noastre, și faptul acesta îl amăra mult. A murit la Paris la 19 august 1963, lăsîndu-ne o neștearsă amintire.

Inspirîndu-mă din frumoasa concluzie cu care, după decesul său, Maurice Ponte a încheiat scurta notă despre Camille Gutton pe care a citit-o în fața confreriei noastre, voi spune în încheiere că el a fost una dintre acele mari figuri iubite și respectate care constituie nobleţea unei Academii ca a noastră și a unei țări ca a noastră.

OMAGIU NAȚIONAL LUI JEAN PERRIN

Cu ocazia celei de-a douăzecea aniversări
a morții sale la Paris, vineri 4 mai 1962.
Ceremonie la Panthéon

Iată-ne, așadar, pe toți în acest înalt loc unde se odihnesc atîtea glorii franceze, reuniți lîngă mormîntul lui Jean Perrin, mort acum douăzeci de ani în Statele Unite, în timp ce țara noastră era supusă grelelor încercări ale ocupației germane. Mulți dintre noi l-au cunoscut și au păstrat o amintire de neșters măreței sale figuri de savant, strălucind toată de inteligență și de bunătate. În prezența familiei sale, a prietenilor săi, a discipolilor și admiratorilor săi, în prezența fiului său care, într-o frumoasă carieră științifică, a pășit pe urmele tatălui și conduce astăzi una din cele mai importante organizații științifice franceze, doresc din tot sufletul să aduc un omagiu omului despre care am păstrat personal o amintire atît de puternică și nu cred să pot face acest lucru mai bine decît evocînd pe scurt opera științifică prestigioasă care a asigurat gloria numelui său.

Opera științifică a lui Jean Perrin

Ultimii ani ai secolului al XIX-lea și primii ani ai secolului al XX-lea au văzut succedîndu-se magnifice descoperiri științifice care au marcat debutul acestei noi perioade a științei și a istoriei omenirii căreia îi dăm de pe acum numele de era atomică.

Printre marile opere ştiinţifice care, în această epocă, ne-au deschis porţile universului atomic, aceea a lui Jean Perrin este una dintre cele mai prestigioase atît prin importanţa rezultatelor pe care le-a obţinut, cît şi prin intuiţiile adeseori geniale care l-au călăuzit în cercetările sale.

Către anul 1890, în momentul în care Jean Perrin, născut în urmă cu douăzeci de ani, intra în Şcoala normală superioară, concepţia atomică despre materie se impunea din ce în ce mai mult atenţiei fizicienilor şi chimiştilor. Întrevăzută de filozofii antichităţii, slăvită şi combătută rînd pe rînd de savanţii secolului al XIX-lea, această concepţie se sprijinea pe zi ce trecea tot mai mult pe un număr crescînd de fapte experimentale. Noţiunile de atom, moleculă, ion, electron se precizau sau se introduceau în ştiinţă. Se presimţea că, pătrunzînd în structura intimă a materiei, fizicienii aveau să vadă deschizîndu-se în faţa lor o lume cu totul nouă. Rămîneau însă multe puncte de clarificat: astfel, natura razelor catodice, ale căror proprietăţi începeau a fi tot mai bine cunoscute, dădeau loc la o controversă: unii susţineau că aceste raze erau constituite dintr-un flux de corpusculi, electronii, în timp ce alţii le considerau ca o formă particulară de radiaţii.

Tocmai această problemă a făcut obiectul primei lucrări capitale a lui Jean Perrin. În 1895, la 24 de ani, concentrînd un fascicul de raze catodice într-un cilindru Faraday, el demonstrează că razele catodice sînt alcătuite din mici corpusculi electrizaţi negativ şi le identifică astfel cu ceea ce numim de atunci electroni. După acest debut strălucit, Perrin, înconjurat de colegi tineri şi entuziaşti ca şi el, dintre care nu voi numi decît pe Paul Langevin, continuă să urmărească cu pasiune progresele fizicii atomice. Puţin timp după descoperirea de către Röntgen a razelor X, el studiază această radiaţie de natură încă misterioasă şi arată că, dacă ea face gazele bune conducătoare şi descarcă corpurile electrizate, o face creînd ioni sau provocînd emisii de electroni. La mai puţin de 30 de ani,

renumele său științific este deja atît de mare, încît este însărcinat cu un curs de chimie-fizică la Facultatea de Științe din Paris, curs pe care îl va preda timp de peste patruzeci de ani. Încă din acea perioadă, în 1901, el dă o remarcabilă dovadă a lucidității concepțiilor sale teoretice propunînd într-un articol din *Revue scientifique* celebrul „model planetar" al atomului, a cărui validitate urma să fie dovedită zece ani mai tîrziu de experiențele lui Rutherford și de calculele lui Bohr.

Începînd din 1905, Jean Perrin întreprinde cercetările care vor constitui partea cea mai magistrală a operei sale. Căutînd să obțină o dovadă indiscutabilă și cît mai direct posibilă a structurii atomice a materiei, el sesizează posibilitatea unei asemenea dovezi în măsurarea exactă a „numărului lui Avogadro", adică a numărului de molecule pe moleculă-gram. Concordanța măsurătorilor acestui număr fundamental prin metode foarte diferite ar furniza, într-adevăr, remarcă el, dovada indiscutabilă a structurii discontinui a materiei.

Iată-l deci pe Jean Perrin în căutarea unui fenomen care să-i permită măsurarea directă a numărului lui Avogadro. Cu o perspicacitate genială, el observa în echilibrul emulsiilor fenomenul căutat. Nu este aici locul să dezvoltăm în detaliu clasicele și admirabilele experiențe ale lui Jean Perrin, pe care le-a rezumat el însuși în cartea sa *Les Atomes*. Este deajuns să amintesc că grăunțele identice de mastic sau de rășină în suspensie într-un lichid în echilibru termic se repartizează în altitudine după o lege cunoscută sub numele de „legea barometrică a lui Laplace" și că observarea acestei repartiții în altitudine este suficientă pentru determinarea numărului lui Avogadro. În urma acestor experiențe, care au cerut timp mult, precauții minuțioase și o prodigioasă îndemînare experimentală, Jean Perrin obține pentru numărul lui Avogadro o valoare de același ordin ca aceea pe care o prevedeau unele calcule ale teoriei cinetice a gazelor și foarte apropiată de aceea care este admisă și astăzi.

Dar, după părerea lui Jean Perrin, dovada crucială a exactităţii ipotezei atomice nu se putea obţine decît prin concordanţa valorilor numărului lui Avogadro obţinute prin metode diferite şi de aceea el a reluat, cu unii dintre elevii săi, determinarea acestei mari constante prin studiul mişcării browniene, a cărei teorie aprofundată o dăduse de curînd Einstein. Experienţele asupra mişcării browniene de translaţie şi asupra mişcării browniene de rotaţie executate de Jean Perrin personal sau sub conducerea sa au furnizat valori ale numărului lui Avogadro foarte apropiate de acelea pe care i le furnizase studiul emulsiilor.

Aceste memorabile experienţe, care aveau să-i aducă lui Jean Perrin un renume internaţional şi atribuirea în 1926 a premiului Nobel pentru fizică, au fost expuse cu detalii şi rezultate în lucrarea sa *Les Atomes*, deja citată, şi el a comparat valorile numărului lui Avogadro cu acelea care pot fi obţinute pornind de la fenomenele cele mai diverse, ca repartiţia spectrală a radiaţiei corpului negru, efuziunea gazelor prin orificii, fluctuaţiile de densitate în fluide aproape de punctul critic, culoarea albastră a cerului în timpul zilei etc. Concordanţa tuturor evaluărilor sale îi permitea să conchidă: „Te cuprinde admiraţia în faţa miracolului acestor concordanţe atît de precise, pornind de la fenomene atît de diferite".

Jean Perrin a desăvîrşit magistrala sa operă în acest domeniu printr-un studiu aprofundat al lamelor lichide extrem de subţiri. El a arătat că aceste lame sînt constituite din straturi monomoleculare care se juxtapun ca treptele unei scări. El a putut măsura grosimea acestor lame monomoleculare şi deduce de aici o limită superioară a masei atomilor în perfect acord cu valorile găsite pentru numărul lui Avogadro.

Nu dispun de timpul necesar pentru a expune aici alte aspecte ale operei ştiinţifice ulterioare a lui Jean Perrin, şi anume cercetările sale teoretice şi experimentale asupra fenomenelor de fluorescenţă, precum şi vederile profunde care i-au per-

mis să interpreteze, cu ajutorul fenomenelor de transmutări nucleare, originea căldurii solare și evoluția universului stelar. Nu putem face decît o rapidă aluzie la frumoasele lucrări pe care Jean Perrin le-a publicat în ultima perioadă a vieții sale: *Grains de Matière et Grains de Lumière*, *Les Éléments de la Physique* și cele opt fascicule intitulate *À la surface des choses*, precum și cartea sa *La Science et l'Espérance*, în care se găsesc atîtea expuneri excelente, observații importante și adesea cugetări nobile.

Și cum aș putea, terminînd, să nu menționez, cel puțin printr-un cuvînt, imensele servicii pe care le-a adus progresului și difuzării cunoștințelor științifice, organizînd Centrul național al cercetării științifice și punînd bazele Palatului Descoperirilor?

Jean Perrin a murit acum douăzeci de ani în Statele Unite, în timpul ocupației germane. Toți cei care l-au cunoscut păstrează despre el o frumoasă amintire. Ei evocă amabilitatea și bunăvoința cu care primea, caracterul său vesel și optimist, admirabila sa figură de profet al timpurilor viitoare. Și ei știu că opera lui va subzista ca unul din cele mai nepieritoare monumente ale științei timpurilor noastre.

VIAȚA ȘI OPERA LUI NIELS BOHR

Cu o dureroasă emoție, lumea științifică a aflat acum trei luni despre moartea survenită la Copenhaga, la 18 noiembrie 1962, a ilustrului fizician Niels Bohr, al cărui nume va rămîne pe bună dreptate unul din cele mai ilustre ale fizicii secolului al XX-lea.

Niels Bohr s-a născut la Copenhaga la 7 octombrie 1885. Fiu al unui profesor de fiziologie de la Universitatea din capitala Danemarcei, și-a făcut studiile în orașul său natal și, în timp ce lucra în laboratorul tatălui său, s-a orientat către studiul fizicii, sub îndrumarea profesorului Christiansen. În 1908 a efectuat primele sale cercetări teoretice și experimentale asupra unor probleme referitoare la tensiunea superficială. Orientîndu-se mai mult spre teorie, a obținut titlul de doctor în 1911, pe baza unei teze privind teoria electronică a metalelor.

Apoi pleacă în Anglia și lucrează succesiv la Cambridge, la Cavendish Laboratory, sub conducerea lui Sir J.J. Thomson, apoi la Manchester, în laboratorul lui Ernest Rutherford, unde se desfășura o susținută viață științifică și unde cercetătorii se preocupau intens de toate problemele privind structura atomilor. În acest mediu favorabil, atenția lui Bohr s-a orientat spre problemele atomice și în 1913, la vîrsta de 27 de ani, a publicat

o lucrare care avea să-i asigure, dintr-o dată, un loc de prim plan printre fizicienii lumii.

Primele informații asupra structurii interne a atomilor pe care fizicienii le-au putut strînge le-au fost furnizate prin observarea spectrelor luminoase pe care diverși atomi sînt susceptibili a le emite: aceste informații au fost completate mai tîrziu de studiul spectrelor razelor X care, datorită lucrărilor lui Laue și ale lui Moseley, începeau a fi cunoscute în momentul în care tînărul Bohr lucra la Manchester. Interpretarea informațiilor astfel obținute rămînea însă o problemă dintre cele mai dificile. Puțin cîte puțin lucrările lui Balmer, ale lui Rydberg și ale lui Ritz au permis clasificarea liniilor spectrelor luminoase și reprezentarea frecvenței lor cu ajutorul unor formule precise, dar empirice, iar ulterior Moseley izbutise și el să descopere legi empirice ale spectrelor razelor X. Dar relațiile astfel descoperite nu puteau fi deloc interpretate cu ajutorul ideilor teoretice pe atunci admise asupra emisiei radiațiilor și Henri Poincaré putea să scrie prin 1905 că adevăratul sens al legilor spectrale rămînea unul din cele mai mari secrete ale naturii. Între timp, ideile noastre cu privire la structura atomilor se precizaseră datorită lucrărilor lui Rutherford și ale școlii sale: se admitea de atunci că în centrul atomului își are sediul un nucleu încărcat pozitiv, în care este concentrată aproape întreaga masă a atomului, nucleu înconjurat de electroni care s-ar învîrti în jurul lui sub acțiunea forței Coulomb, așa cum se învîrtesc planetele în jurul Soarelui. Dar acest model planetar al atomului nu permitea explicarea legilor spectrale, deoarece, aplicîndu-i-se ideile teoriei electromagnetice asupra emisiei radiațiilor prin sarcini în mișcare, se ajungea la presupunerea că atomii trebuiau să emită radiații de frecvență continuu variabilă și că trebuiau să fie instabili, deși se știe bine că atomii sînt stabili și susceptibili de a emite linii spectrale de frecvență bine definită. Niels Bohr a avut atunci ideea remarcabilă că, pentru a prevedea fenomenele spectrale reale, trebuie să

i se aplice modelului planetar al atomului legile cuantelor pe care în 1900 Planck, printr-o intuiție genială, le introdusese în teoria radiației corpului negru și care îi permiseseră să interpreteze în sfîrșit legea experimentală ce dă repartiția spectrală a energiilor în radiația de echilibru termic.

Bohr admite, așadar, că mișcarea electronilor în atomul planetar este cuantificată, că mișcările cuantificate ale electronilor intraatomici sînt stabile și că, contrar afirmațiilor teoriei electromagnetice clasice, ele nu dau naștere nici unei radiații. Radiația apare atunci cînd atomul trece brusc de la o stare cuantică la alta, ducînd cu sine energia pe care atomul o pierde în această bruscă tranziție. Aplicînd relația dintre energie și frecvență ($E = h\nu$), caracteristică teoriei cuantelor, Niels Bohr enunță celebra sa „lege a frecvențelor", care îi permite să prevadă frecvența radiației emise la fiecare tranziție cuantică.

Bazîndu-se pe acest ansamblu de idei noi, tînărul fizician danez regăsește forma exactă a legilor spectrale revelată prin experiență. El regăsește în special formula lui Balmer cu valoarea numerică exactă a constantei lui Rydberg care figurează în ea; el interpretează spectrul heliului ionizat, precum și faptul, curios la prima vedere, că constanta lui Rydberg pentru heliu n-are chiar aceeași valoare ca pentru hidrogen. El furnizează astfel o schemă generală, conformă în liniile ei mari faptelor, a ansamblului spectrelor elementelor, schemă care permite și interpretarea imediată a legii lui Moseley, lege care leagă frecvențele observate în domeniul X de numărul atomic al elementului emițător. El leagă, în sfîrșit, variația periodică a proprietăților elementelor din tabloul lui Mendeleev de existența nivelurilor de energie pentru electronii atomici, ceea ce permite ca, pe baza determinării potențialelor de ionizare și de rezonanță, să se deducă valoarea acestor niveluri de energie.

Publicarea memoriului lui Bohr în 1913 a fost pentru fizicieni o adevărată revelație. Lumea necunoscută a interiorului atomului se deschidea

brusc în fața lor: sute de fapte experimentale, inexplicabile pînă atunci, își găseau în ele din urmă interpretarea. Toate cercetările fizicii atomului primeau prin aceasta un imbold decisiv.

Bohr însă nu se îmbătă de succes. Dovedind în acest fel profunzimea spiritului său, sesiza lacunele operei lui și cerea ca imaginea atît de seducătoare furnizată de modelul planetar al atomului să nu fie luată prea ad litteram. Introducerea stărilor staționare cuantificate ale atomului și a tranzițiilor bruște între aceste stări îi păreau să indice că conceptele noastre obișnuite privind mișcarea corpusculilor nu sînt riguros aplicabile fenomenelor atomice, opinie pe care dezvoltarea mecanicii ondulatorii avea s-o justifice, zece ani mai tîrziu, în întregime.

Una din lacunele pe care Bohr le putea sesiza cu ușurință în opera lui era că teoria sa despre atom, dacă permitea să se prevadă cu exactitate frecvențele liniilor spectrale, nu fixa nici intensitatea și nici polarizarea lor. În timp ce Sommerfeld și alții, continuînd opera lui Bohr, precizau calculul frecvenței liniilor spectrale, tînărul savant danez, printr-un nou și remarcabil efort, ajungea la o previziune aproximativă a intensităților și a polarizărilor, datorită folosirii „principiului de corespondență“ pe care l-a enunțat în 1916. Curios principiu, într-adevăr, care este mai curînd o idee directoare decît un veritabil principiu! Pornind de la observația că teoria electromagnetică clasică reprezintă cu exactitate fenomenele la scară mare, el trage concluzia de aici că această teorie trebuie să fie o reprezentare *statistică* exactă a fenomenelor în care intervin un mare număr de cuante. Extrapolînd această idee în domeniul numerelor cuantice mici, el extrage de aici o metodă care permite ca, pe baza formulelor electromagnetice clasice, să se deducă unele indicații aproximative asupra intensității și polarizării liniilor spectrale emise de atomi, indicații pe care experiența le confirmă. De atunci, acest principiu de corespondență, profund prin importanța lui și suplu în aplicațiile sale, va servi drept

ghid unei întregi şcoli de fizicieni. După ce fusese conferenţiar la Copenhaga şi la Manchester, Niels Bohr revine definitiv la Copenhaga în 1916 ca profesor titular de fizică teoretică. Elevii se inspiră de atunci din gîndirea sa şi realizează lucrări strălucite: printre ei este şi Werner Heisenberg care în curînd, la 25 de ani, avea să dezvolte a sa mecanică cuantică.

Continuînd reflecţiile sale asupra structurii atomului, Niels Bohr a arătat, în anii care au urmat primului război mondial, cum edificiul atomic se complică treptat, pe măsură ce înaintăm în tabloul lui Mendeleev. De aici a tras tot felul de concluzii asupra edificării straturilor şi nivelurilor de electroni intraatomici şi asupra corelaţiilor care există între această edificare progresivă şi variaţia concomitentă a proprietăţilor elementelor. Aceste cercetări foarte importante au avut un mare răsunet, iar legea de saturaţie a nivelurilor electronice, la a cărei precizare a condus ea, poate fi pusă în strînsă legătură cu principiul de excluziune, enunţat ceva mai tîrziu de W. Pauli.

Nu am putea să terminăm acest examen al primei părţi a operei lui Bohr, fără a semnala că el mai este şi autorul unei teorii a încetinirii suferită de electroni în timp ce traversează materia, teorie care a jucat şi joacă încă un mare rol în interpretarea acestui gen de fenomene.

Dar din 1930 încoace descoperirile referitoare la nucleul atomului, la razele cosmice, la constituenţii ultimi ai materiei (neutroni, pozitroni, mezoni,...) se înmulţesc. Bohr nu rămîne indiferent în faţa lor, ci orientează o parte dintre elevii săi din Copenhaga spre studierea acestor probleme. El însuşi, demonstrînd, odată mai mult, originalitatea spiritului său, a dezvoltat o concepţie nouă despre ciocnirea unei particule de un nucleu, insistînd asupra faptului că particula intră în coliziune nu cu unul din constituenţii nucleului, ci cu nucleul considerat în ansamblul său, şi această lucrare importantă a contribuit la progresul fizicii nucleare. El conti-

nua să elaboreze profunde studii teoretice asupra fenomenului fisiunii nucleare cînd ocuparea Danemarcii de către germani l-a silit să-şi părăsească ţara. Revenit la Copenhaga în 1945, devenit preşedinte al Academiei de Ştiinţe daneze, a continuat să îndrume şi să anime un grup important de cercetători. Lucrînd în legătură cu C.E.R.N. din Geneva, a contribuit extrem de mult la organizarea serviciului de cercetări teoretice al acestui important centru de studii nucleare. Era încă în plină activitate intelectuală cînd moartea l-a lovit subit.

În această analiză a lucrărilor lui Niels Bohr am lăsat intenţionat deoparte pînă acum interpretarea dată de el mecanicii ondulatorii şi cuantice pe baza concepţiei sale despre „complementaritatea" undei şi corpusculului şi aceasta fiindcă concepţia respectivă îmi inspiră, la ora actuală, multe îndoieli. A sosit însă momentul să spun cîteva cuvinte în legătură cu această chestiune. În perioada 1923—1927, insuficienţa vechilor teorii cuantice fusese recunoscută şi luase naştere mecanica ondulatorie. Bohr a urmărit cu interes această mişcare de idei la care participa elevul său Werner Heisenberg, atunci cînd a dezvoltat, în 1925, „Mecanica cuantică", despre care, ceva mai tîrziu, Erwin Schrödinger avea să arate că nu este decît o transpunere matematică a mecanicii ondulatorii. Interpretarea „probabilistă" a mecanicii ondulatorii de către Max Born şi deducerea de către Heisenberg a faimoaselor sale „relaţii de incertitudine" l-au orientat pe Bohr spre o interpretare a mecanicii ondulatorii cu totul diferită de aceea care călăuzise eforturile primului autor al acestei teorii. În timp ce eu concepeam corpusculul ca pe o foarte mică regiune de înaltă concentraţie de energie, încorporată unei unde cu caracter fizic care se propagă în spaţiu în cursul timpului, Niels Bohr, prin raţionamente subtile, dar uneori cam vag conturate, ajunsese să considere unda şi corpusculul ca „aspecte complementare" ale realităţii fizice care se manifestă succesiv, dar niciodată simultan. În urma Consiliului de fizică Solvay, ţinut la Bruxelles în octombrie

1927, opinia lui Bohr a fost adoptată de majoritatea teoreticienilor, care dealtfel i-au dat adeseori forme destul de diferite de aceea propusă inițial de autorul ei.

Totuși, această teorie a „complementarității" comporta consecințe grave: abandonarea relațiilor cauzale între fenomenele fizice succesive, abandonarea oricarei imagini clare despre undă și corpuscul în cadrul spațiului și timpului, în sfîrșit abandonarea, proclamată iremediabilă, a oricărei reprezentări a tranzițiilor cuantice care „ar transcende" orice descriere. Renunțări atît de mari, atît de puțin conforme cu modurile de gîndire care asiguraseră succesul științei moderne, sînt oare, într-adevăr, necesare? Ca dealtfel Planck și Schrödinger, Albert Einstein nu s-a raliat niciodată punctului de vedere al lui Bohr și cei doi iluștri fizicieni au avut între ei vii controverse pe această temă. Einstein a considerat întotdeauna că forma dată mecanicii cuantice de cei mai mulți teoreticieni constituia o teorie statistică exactă, dar că ea nu dădea o descriere *completă* a realității fizice: el înțelegea, desigur, prin aceasta că descrierea completă trebuia să comporte o imagine precisă a relațiilor dintre undă și corpuscul, foarte diferită de concepția destul de nebuloasă a complementarității. Personal, revenind la ideile mele inițiale, sînt de vreo zece ani din nou convins că Einstein avea dreptate și că trebuie obținută o reinterpretare a mecanicii ondulatorii care, respectînd în ansamblul lor legile statistice, desigur exacte, precum și ceea ce numim astăzi „mecanica cuantică" și „teoria cuantică a cîmpurilor", ar restabili pentru undă și pentru corpuscul imagini fizice clare și bine definite. Nu este însă aici locul să întreprindem o analiză a acestei prea dificile probleme și ne vom mărgini să constatăm că teoria complementarității a jucat un rol foarte mare în evoluția fizicii contemporane și că ea pare a se bucura încă de simpatia celor mai mulți teoreticieni.

Acestea fiind spuse, și oricare ar fi soarta pe care viitorul o rezervă concepției bohriene a complemen-

tarității, este cert că opera globală a ilustrului fizician din Copenhaga rămîne demnă de cea mai vie admirație. Din această operă, și cu deosebire din memorabila sa teorie despre atom și despre nenumăratele ei implicații, a decurs întreaga imensă dezvoltare a fizicii atomice și nucleare de o jumătate de secol încoace: fără Niels Bohr toată această dezvoltare ar fi fost imposibilă. De aceea numele său va rămîne, fără nici o îndoială, unul din cele mai mari ale științei secolului al XX-lea. Dealtfel, acest om, amabil și binevoitor, inspira tuturor simpatie. Trebuie deci să ne înclinăm cu respect în fața marii figuri a gloriosului fizician dispărut de curînd.

OMAGIU
MEMORIEI LUI ÉMILE MEYERSON

Domnule Preşedinte, doamnelor, domnilor[1],

Ceea ce poate justifica participarea mea la omagiul ce se aduce astăzi memoriei eminentului gînditor care a fost Émile Meyerson este faptul că l-am cunoscut întrucîtva la sfîrşitul vieţii sale şi că am avut atunci cu el convorbiri interesante asupra evoluţiei prin care trecea în acea perioadă fizica teoretică. Îl revăd încă, într-o vastă cameră din apartamentul său, aşezat într-un fotoliu încăpător pe care, bolnav deja, nu-l mai părăsea. Figura sa gînditoare, lunga sa barbă căruntă, atmosfera de reculegere care îl înconjura evocau în mintea mea celebrul tablou al lui Rembrandt, *Filozof în meditaţie*. La el am întîlnit destul de des pe Paul Langevin, pe generalul Metz, pe André Georges şi pe alţi cîţiva.

Meyerson dorise să cunoască pe omul, tînăr încă, îndrăzneţ şi timid totodată, al cărui nume îi atrăsese de curînd atenţia prin înalta recompensă internaţională pe care o primise. El voia să mă întrebe despre progresele recente ale fizicii atomice şi cuantice şi despre evoluţia noilor teorii fizice, al căror mare interes îl cunoştea, dar a căror orientare îi inspira, desigur, unele îngrijorări.

---

[1] Discurs pronunţat la Sorbona în faţa Societăţii franceze de filozofie, la 26 noiembrie 1960.

Într-adevăr, Meyerson era convins că omul de știință trebuie, în mod necesar și instinctiv, și, dealtfel, rațional, să creadă în realitatea obiectivă a lumii exterioare; în operele sale insistase nu o dată asupra îngustimilor și aspectelor sterilizante din interpretările sistematic pozitiviste sau pragmatiste ale cunoașterii științifice. Așadar, nu fără mirare și fără aprehensiune vedea el fizica teoretică angajîndu-se de cîțiva ani pe căi care o făcuseră să nu mai distingă cu claritate obiectivul de subiectiv, să pară a pune la îndoială realitatea lumii exterioare și să multiplice, ca altădată Auguste Comte, interdicțiile pretins definitive, în numele unui „fenomenism" intransigent. Această orientare cu totul nouă a teoriei fizice nu-mi aparținea. După ce enunțasem concepțiile de bază ale mecanicii ondulatorii și le văzusem confirmate de experiență, căutasem să obțin din uniunea strînsă a undelor și corpusculilor pe care ea o introducea o imagine concretă și văzusem și eu cu îngrijorare și cu mirare dezvoltîndu-se o interpretare în întregime diferită de ceea ce descoperisem eu. Îmi amintesc că, în perioada aceea, în cursul unei conversații, un membru al Academiei de Științe îmi spusese: „Tinere, ai făcut o descoperire: ei bine, clocește-ți bine oul". Această frază și imaginea pe care o evoca mă amuzase mult. Or, după ce-mi clocisem bine oul, am văzut cu surprindere ieșind din el ceva ce nu era deloc ceea ce așteptam. Atunci cînd l-am cunoscut pe Meyerson, această surpriză era încă destul de recentă și din această cauză eram, mai mult decît alții, susceptibil să înțeleg mirarea și îngrijorările filozofului din *Identité et Réalité*. Cunoșteam însă foarte bine, întrucît mă lovisem de ele, dificultățile considerabile pe care le prezenta dezvoltarea unei imagini concrete a legăturii dintre unde și corpusculi, imagine care să exprime tot ceea ce progresele mecanicii ondulatorii ne revelaseră. Dar, neputînd să duc la bun sfîrșit tentativele mele de interpretare concretă și văzînd că cei mai mulți teoreticieni ai fizicii cuantice resping sugestiile mele, mă resemnasem să adopt interpre-

tarea lor probabilistă și nu mai speram că s-ar mai putea găsi alta. De aici rezultau, în convorbirile mele cu Meyerson, unele fluctuații: în unele momente simpatizam în totul cu el, căci mă simțeam atras de ideile pe care le dezvolta, în alte momente îmi spuneam că aceste idei erau condamnate de evoluția contemporană a fizicii teoretice.

În momentul în care diverși cercetători, printre care și cel ce vă vorbește, se întreabă dacă nu s-a mers prea departe în abandonarea imaginilor concrete și a realismului fizic și dacă într-adevăr, cum pretind unii, descoperirea fenomenelor cuantice nu ne-a obligat să modificăm complet baza explicațiilor științifice, o examinare rapidă a ideilor lui Meyerson prezintă un mare interes și vine cu adevărat la momentul potrivit.

Pentru Meyerson, știința nu caută în mod exclusiv să formuleze legi, așa cum se afirmă adeseori: ea cercetează în mod necesar și cauzele. Pentru el, dacă s-ar mulțumi cu „legitatea" fără a se preocupa de „cauzalitate", știința ar deveni analoagă magiei. El avea dreptate, și aceasta fără îndoială — am putea adăuga noi — din cauză că fizica cuantică contemporană a renunțat parțial la cauzalitate, unele din aspectele sale pot lua — conform unei observații malițioase a lui Schrödinger — un caracter de magie. Pentru Meyerson, adevărata explicație științifică urmărește în mod necesar cauzalitatea, concepută sub forma unei persistențe sau a unei legături cauzale în timp, a unui fel de preformare a consecventului în antecendentele sale. În acest sens, după el, a explica înseamnă a identifica, iar cauzalitatea merge mai departe decît legitatea, deoarece ea cere o anumită identitate în timp a elementelor realității fizice.

Această concepție asupra mersului gîndirii științifice Meyerson și-a format-o după lungi meditații, sprijinite pe o profundă cunoaștere a istoriei științei. Era convins că, în liniile ei mari, mersul gîndirii umane este același la toți oamenii, la omul civilizat ca și la cel primitiv, la savant ca și la omul de

pe stradă. De aceea, dădea multă importanță studiului vechilor teorii științifice, chiar a acelora care ni se par astăzi naive sau perimate, deoarece le considera pe toate ca revelatoare, sub diversele lor forme, a tendințelor profunde ale spiritului nostru în efortul pe care îl efectuează căutînd să înțeleagă succesiunea fenomenelor naturale. De aceea a supus unei analize foarte fine și aprofundate evoluția teoriilor mecanice și atomice din antichitate pînă în zilele noastre, precum și aceea a teoriilor nemecanice, cum este fizica calității a lui Aristotel. Chimist devenit filozof, Meyerson nu putea să nu se intereseze în mod special de istoria teoriilor chimiei. El a arătat interesul real al teoriei, totuși inexactă, a flogisticului și a scos bine în evidență opera capitală a lui Lavoisier.

Deoarece Meyerson vedea în teoriile fizice, înainte de toate, un mare efort de identificare, marile principii de conservare ale fizicii trebuiau, firește, să fie obiectul unui studiu foarte atent din partea sa. Cu o mare finețe a analizat el principiul inerției, care exprimă conservarea cantității de mișcare, principiul conservării energiei și cel al conservării materiei. El regăsește pretutindeni tendința rațiunii noastre de a discerne permanențe în necontenita curgere a lucrurilor. A analizat de asemenea teoriile corpusculare vechi și contemporane, în care observă un fel de „sferă a lui Parmenide", precum și teoriile „cîmpului" care, într-un anumit sens, sfîrșesc prin a identifica materia și spațiul. În toate aceste tentative, el regăsește tendința „de a identifica" a rațiunii umane și, constatînd succesele obținute, trage de aici concluzia că numai rațiunea singură ne poate conduce la înțelegerea și explicarea fenomenelor naturale.

Eminentul filozof era însă un spirit prea fin, prea obișnuit să cîntărească ce e pentru și ce e contra, prea convins că ideile, chiar exacte, au limitele lor de validitate, pentru a nu resimți tot ce era irealizabil în riguroasa desăvîrșire a procesului

de identificare urmărit de știință. Autorul lucrării *Identité et Réalité* regăsea astfel ideile care îl inspiraseră de la primele sale lucrări. Dacă, spunea el, efortul rațiunii umane, atunci cînd construiește teorii științifice, este esențialmente un efort de identificare în sensul mai sus precizat, dacă acest efort a condus la foarte mari succese, dezvăluindu-ne astfel profunde articulații ale realului, el n-ar putea totuși să-și atingă complet scopul, deoarece ar ajunge atunci la concluzia absurdă că lumea fizică nu este decît o vastă tautologie. Această lume fizică, așa cum o putem cunoaște prin percepțiile noastre, este în esență diversă și eterogenă, noi nu o putem studia fără a nu ne lovi mereu de „irațional", iraționalul fiind, în sensul lui Meyerson, „ceea ce rezistă la identificare". Știința vrea să regăsească pretutindeni identicul și preexistentul: într-un sens, aceasta este o pretenție nebunească, ce trebuie să se lovească mereu de diversitatea lumii reale, de iraționalul meyersonian.

După ce am rezumat astfel acest aspect al gîndirii lui Meyerson, cum am putea să nu evocăm subtila antiteză a lui Paul Valéry: „Omul este absurd prin aceea că el caută, dar e admirabil prin aceea că el găsește".

Să notăm, în treacăt, că studiul aprofundat al principiului lui Carnot, care diferă de toate celelalte principii ale științei prin faptul că implică un sens privilegiat al evoluției lumii, reținuse mult timp atenția eminentului gînditor care vedea în el cel mai bun exemplu al cazurilor în care tendința de a identifica a rațiunii noastre se lovește de o anumită „iraționalitate" a devenirii fizice.

Cu toate acestea, deși sesiza clar limitele pe care natura lucrurilor le impune raționalizării totale a realului, Meyerson vedea în opera științei un efort continuu al gîndirii noastre pentru a descoperi pretutindeni în lumea fizică identitatea și permanența, pentru a explica această lume fizică „prin-

într-un minimum de *lucruri* exterioare spiritului și de lucruri care se conservă". El considera această evoluție a gîndirii științifice drept normală, evoluție care fusese rodnică în trecut și ajunsese la marile succese ale științei moderne, calea de la care teoria fizică nu trebuie să se abată în viitor pentru că își dovedise validitatea. Se înțelege deci cu ușurință că, în jurul anului 1930, Meyerson îi văzuse cu uimire și îngrijorare pe fizicienii teoreticieni părînd a pune la îndoială obiectivitatea lumii fizice și încetînd a crede într-o legătură cauzală a fenomenelor ce se succed. Desigur, el însuși insistase asupra apariției frecvente și, după părerea sa, inevitabile a iraționalului în lumea fizică, dar credea că spiritul uman va căuta întotdeauna, și cu succes, să reducă partea de irațional fără să reușească vreodată complet și să regăsească în fluxul fenomenelor observabile legături de cauzalitate. În micul fascicul pe care l-a scris pentru colecția Actualități științifice și industriale sub titlul *Réel et Déterminisme en Physique quantique* (Paris, Hermann, 1933) și care a fost, cred, ultima sa scriere, el examinase, în obișnuita sa manieră prudentă și meticuloasă, evoluția teoriilor fizicii cuantice. Fără a se pronunța categoric împotriva indeterminismului cuantic, se simțea că e plin de rezerve față de formele pe care acesta le lua atunci în lucrările multor oameni de știință. La sfîrșitul expunerii sale scria: „Orice ar avea, fizicianul nu se poate gîndi la un lucru care ar fi *în același timp* corpuscul și undă și trebuie să se mulțumească a gîndi la un obiect care este, rînd pe rînd, unul sau alta[1]. Și atunci, noțiunea însăși a obiectului tinde să pălească la el, tinde să-i scape în așa măsură încît, în dezorientarea sa, ajunge să-și limiteze gîndirea la matematica pură, să nu mai raționeze decît

[1] Teoria dublei soluții, pe care o enunțasem în 1927 și pe care în prezent o reiau, are ca obiectiv tocmai evitarea acestei obligații, realizînd o reală sinteză a undei și corpusculului.

ca matematician. De aici — iar nu din anomaliile indeterministe — provin, după cît ni se pare, afirmațiile fenomeniste sau idealiste ale unor savanți (ca Bohr, Born și Heisenberg). Am arătat cu cîtă prudență se cuvine să le primim". Și adăuga: „Fizicianul cuantelor, ca fizician, gîndește desigur ca realist, nu poate gîndi decît ca realist". Apoi, ceva mai departe, termina spunînd: „Fizicianul, în viitor, va fi aproape inevitabil împins, așa cum au spus savanți eminenți, să caute semnificația fizică a conceptelor pe care i le furnizează raționamentul matematic... Nu ne putem îndoi, într-adevăr, că, dacă s-ar oferi cea mai mică posibilitate, am vedea pe cercetători revenind, în grabă, la o imagine a Universului cît de cît concretă, realizabilă în gîndire, la un Weltbild, după expresia lui Planck".

Acum aproape treizeci de ani, cînd citeam această concluzie la sfîrșitul unui fascicul a cărui prefață o scrisesem, cu tot respectul pe care mi-l inspira măreața figură a unui mare gînditor ponderat și imparțial, care ajungea atunci la capătul carierei sale, mă întrebam dacă avea dreptate. Ideile pe care le dezvolta mi se păreau juste, dar nu eram sigur că ele ar fi compatibile cu evoluția recentă a fizicii cuantice, cu ansamblul concepțiilor pe care, sub presiunea opiniei aproape unanime a colegilor mei fizicieni teoreticieni, le introdusesem în cercetările mele și în cursurile predate. Astăzi mă simt cu mult mai dispus decît atunci să-l aprob în întregime. Orice ar crede mulți dintre tinerii fizicieni, care poate că n-au meditat îndeajuns asupra învățămintelor istoriei științelor, stadiul actual al fizicii cuantice nu are, desigur, nimic definitiv și dacă s-ar ajunge, revenindu-se la primele mele idei, după cum sper din nou de cîțiva ani, să se interpreteze mecanica ondulatorie revenindu-se la imagini mai concrete ale realității microfizice, s-ar constata din nou tot ce era profund în concepțiile lui Meyerson, tot ce era poate profetic în concluziile pe care le-am citat adineauri.

Nu este însă aici locul să se deschidă controverse asupra transformărilor posibile ale teoriilor fizicii cuantice și vreau doar, terminînd, să exprim dorința ca opera atît de profund originală a lui Émile Meyerson, această operă în care el, ani îndelungați, studiase cu atîta grijă, finețe și erudită competență edificarea științei de către spiritul uman, să nu cadă într-o uitare care ar fi cu totul nejustificată și ca, prelungind acțiunea unei gîndiri puternice, să continue în viitor să alimenteze meditațiile acelora care reflectează asupra mersului gîndirii științifice.

PASCAL — OM DE ŞTIINŢĂ[1]

Doamnelor, domnilor,

În omagiul adus astăzi memoriei lui Blaise Pascal, îmi revine rolul de a vorbi despre opera sa ştiinţifică. Trebuie, în primul rînd, să amintesc că, dacă Pascal, încă din fragedă adolescenţă, a manifestat pentru ştiinţă un gust şi aptitudini remarcabile, a fost nu numai fiindcă aceasta era una din tendinţele înnăscute ale geniului său fulgurant, ci şi fiindcă găsise în familia sa un mediu favorabil dezvoltării acestei tendinţe. Tatăl său, Etienne Pascal, era preşedintele Curţii auxiliarilor din Clermont-Ferrand, dar, fiind un spirit de mare anvergură, nu şi-a limitat activitatea la îndeplinirea meseriei sale de înalt funcţionar al administraţiei finanţelor. Cum se întîmpla adeseori în epoca aceea, în momentele sale de răgaz cultiva ştiinţele, era un excelent geometru şi lui, iar nu fiului său, îşi datorează denumirea de „melcul lui Pascal" una din curbele clasice ale geometriei. Etienne Pascal era în relaţii permanente cu întregul grup de savanţi al cărui animator şi secretar era pe atunci părintele Mersenne, grup care urma să capete mai tîrziu, datorită lui Colbert, o existenţă oficială şi să devină Academia de Ştiinţe.

---

[1] Discurs pronunţat la Sorbona la 13 iunie 1962.

Blaise Pascal, născut în 1623, a fost, după cum se știe, un copil foarte precoce. Nu trebuie totuși să credem că tatăl său, văzîndu-l foarte dotat, l-ar fi împins de timpuriu spre studiul matematicilor. Dimpotrivă, el căuta mai curînd să-l abată de la ele, vrînd în primul rînd să-l facă să-și însușească o solidă cultură clasică și literară. Științele însă îl atrăgeau în mod invincibil și, cu toate că tatăl său n-ar fi vrut să-i orienteze studiile în această direcție, el a fost foarte de tînăr un veritabil autodidact în această materie. Povestiri relatate mai tîrziu de persoane din familia lui spun că la vîrsta de 11 ani, atenția fiindu-i atrasă de studiul fenomenelor sonore, a compus un adevărat mic tratat de acustică. La 12 ani ar fi redescoperit el însuși toată prima parte a geometriei lui Euclid pînă la și inclusiv a 32-a teoremă a lui Euclid, după care suma unghiurilor unui triunghi este întotdeauna egală cu două unghiuri drepte, teoremă căreia i-a dat o demonstrație printr-o metodă foarte directă.

E greu de spus dacă este sau nu vreo exagerare în reușitele matematice din copilărie ce i se atribuie lui Blaise Pascal, pare însă cert că la o vîrstă foarte tînără el a dat dovadă de o inteligență extraordinar de precoce și îndreptată de pe atunci spre problemele științifice. Ceea ce este absolut sigur e că la 16 ani a scris un „tratat despre conice", conținînd rezultate de o mare originalitate. În această lucrare și în acelea care au urmat, Pascal, inspirîndu-se din lucrări anterioare ale lui Desargues, a făcut imense și foarte importante aplicații noi la curbele care, de la geometri greci, poartă numele de „secțiuni conice". Unul din rezultatele cele mai remarcabile pe care le-a obținut astfel este o renumită teoremă relativă la hexagoanele înscrise într-o conică, teoremă care oferă, în fond, condiția pentru ca șase puncte luate într-un plan să fie așezate pe aceeași conică. Această teoremă, denumită uneori hexograma mistică, îi fusese inspirată de un rezultat analog obținut de Desargues, dar ea a constituit o generalizare foarte largă

a acesteia. Cu toate că Descartes, întotdeauna foarte personal și puțin binevoitor, ar fi judecat cu destulă severitate lucrarea genialului adolescent, această lucrare constituia, atît prin metodele folosite, cît și prin rezultatele obținute, o etapă decisivă în progresele geometriei. Animată de un spirit foarte diferit de acela care îi inspirase lui Descartes geometria sa analitică, ea rămînea pe linia clasică a geometriei tratate direct, fără ajutorul algebrei, și deschidea calea aceleia care avea să devină mai tîrziu, datorită în special lui Poncelet la începutul secolului al XIX-lea, geometria proiectivă.

În timp ce cariera științifică precoce a lui Blaise Pascal începea cu atîta strălucire, tatăl său, după ce părăsise Curtea auxiliarilor din Clermont și locuise cîțiva ani la Paris, fusese trimis la Rouen de către cardinalul Richelieu ca intendent al Normandiei; această funcție a deținut-o din 1632 pînă în 1648. Tocmai atunci cînd abia depășise 20 de ani, tînărul Pascal, doritor să-și ajute tatăl, care avea de efectuat calcule complicate pentru repartiția impozitelor, inventează și dirijează el însuși construirea primei „mașini aritmetice": el obține pentru fabricarea acestei mașini un „privilegiu" din partea cancelarului Séguier și de aici un beneficiu comercial. Cu toate că mașina aritmetică este bazată pe principii simple, care nu cer un raționament matematic complicat, punerea ei la punct era delicată, mai ales în acea epocă în care nu se folosea sistemul zecimal și cînd, pentru a facilita calculele lui Etienne Pascal, trebuia să se țină seamă de faptul că unitatea monetară de atunci, livra, valora douăzeci de bani. Invenția mașinii aritmetice de către Pascal a furnizat primul prototip simplu al unei mașini de calculat. Și în acest domeniu Pascal a fost un mare precursor: ne dăm seama astăzi, în special, întrucît de vreo douăzeci de ani, datorită resurselor pe care știința electronicii le pune la dispoziția tehnicienilor, au fost construite și necontenit perfecționate acele puternice și costisitoare mașini care se numesc „calculatoare elec-

tronice“ și care efectuează în cîteva secunde calcule care ar solicita creierul uman ore sau chiar ani. Ideea de a construi o mașină susceptibilă să efectueze rapid calcule a fost așadar o idee fecundă și plină de viitor. Pascal, care a avut nevoie de nouă ani spre a pune complet la punct invenția sa, a întrevăzut clar importanța, dar totodată și limitele ei. Ca și cum ar fi presimțit dinainte exagerările unor ciberneticieni contemporani, el a scris cu multă justețe: „Mașina aritmetică realizează efecte care se apropie de gîndire mai mult decît tot ce fac animalele, dar ea nu face nimic care ne-ar putea face să spunem că are voință ca animalele“.

Pascal este cufundat încă în lucrările sale pentru realizarea mașinii aritmetice cînd, în 1644, atenția acestui tînăr de 21 de ani, îndreptată mereu spre noi investigații, este atrasă de o altă problemă, căci părintele Mersenne tocmai îi revelase invenția, făcută în Italia, a unui admirabil instrument nou: barometrul. La începutul reflecțiilor sale asupra acestui nou subiect, Pascal pare să fi ignorat că invenția barometrului era datorată lui Torricelli și să nu fi cunoscut ideile acestui discipol al lui Galilei privitor la presiunea aerului. Faptul, de multă vreme cunoscut, că, dacă prin extremitatea superioară se aspiră aerul conținut într-un tub a cărui extremitate inferioară e cufundată într-un lichid, lichidul se ridică în tub și umple porțiunea de tub în care s-a făcut vid, era de mult interpretat, spunîndu-se că „Natura nu suportă vidul“. Aceasta era o manieră acceptabilă în fond de a traduce faptul experimental, dar nu era cîtuși de puțin o explicație veritabilă. Or, în epoca despre care vorbim, inginerii fîntînari din Florența au descoperit un lucru foarte tulburător: dacă se încearcă să se ridice o coloană de apă într-un tub foarte lung prin aspirare la capătul de sus al tubului, se constată că apa refuză să urce la peste aproximativ zece metri, lăsînd un vid în partea de sus a tubului. Galilei, care avusese cunoștință de acest fapt neașteptat, îl interpretase spunînd că oroarea

naturii de vid avea o limită și Pascal pare să fi adoptat la început acest destul de ciudat punct de vedere. Curînd însă el se răzgîndi și adoptă explicația propusă de Torricelli pentru a verifica înălțimea limitată a coloanei de mercur din tubul său barometric. Această explicație, foarte rațională de data aceasta, admite că atmosfera, exercitînd o anumită presiune asupra bazei coloanei de lichid, o face să urce în tubul evacuat, dar că această ascensiune se oprește atunci cînd greutatea coloanei ridicate echilibrează presiunea atmosferei. De îndată ce s-a raliat la această idee, Pascal proclamă că natura nu are nicidecum oroare de vid și că, deasupra nivelului lichidului care s-a ridicat în tubul barometric, capătul de sus al acestui tub este realmente vid. El intră astfel în contradicție flagrantă cu ideile lui Descartes ale cărui revendicări de prioritate, în ceea ce privește admirabilele experiențe ale lui Pascal, nu par deloc întemeiate. Dovedindu-se un experimentator tot atît de abil pe cît de profund teoretician, Pascal imaginează și realizează experiențe foarte ingenioase, foarte greu de dus la bun sfîrșit cu mijloacele de care se dispunea atunci: aceste experiențe îi aduc dovezi foarte convingătoare în favoarea vederilor sale teoretice. Cum însă adversarii săi continuau să adreseze critici interpretărilor sale, Pascal, care se ocupa de această problemă de aproape doi ani, se decide în toamna anului 1647 (nu avea decît 24 de ani) să pună să se execute sub conducerea sa o experiență crucială, constînd în măsurarea simultană a înălțimii mercurului dintr-un barometru, la poalele unui munte înalt, la vîrful acestui munte și eventual la jumătatea înălțimii acestuia. Locuind în Paris, el nu poate executa personal experiența, cum însă cumnatul său, Florin Périer, soțul surorii sale Gilberte, este consilier la Curtea auxiliarilor din Clermont-Ferrand, îi scrie la 15 noiembrie 1647 cerîndu-i să efectueze măsurătorile necesare la Clermont, la poalele lui Puy de Dôme și la vîrful acestui munte destul de înalt, dîndu-i în acest scop toate instrucțiunile necesare. Din di-

verse motive, Périer nu-l poate satisface imediat pe cumnatul său și abia la 19 septembrie 1648, dată memorabilă în istoria științei, poate executa măsurătorile cu ajutorul cîtorva clerici preocupați de știință din Clermont-Ferrand.

Istoria acestei experiențe este prea cunoscută pentru ca să insist aici asupra ei: voi aminti numai că ea a adus o confirmare completă și de necombătut ideilor lui Pascal asupra cauzei care produce ascensiunea mercurului în tubul barometric Meritul realizării experienței revine, fără îndoială, lui Périer și colaboratorilor săi clermontezi, dar Pascal, care a întocmit planul experienței și care a dirijat de la distanță întreaga execuție cu o extremă precizie, ne apare aici ca unul dintre primii realizatori ai riguroasei metode experimentale a științei moderne.

Pascal, care a repetat la Paris experiența de la Puy de Dôme — tot cu rezultate pozitive, dar la o scară mai mică —, între baza și vîrful turnului Saint-Jacques și, fără îndoială, între parterul și etajul superior al unei case, a întrevăzut imediat în ea cîteva aplicații practice, cum ar fi evaluarea altitudinilor prin variațiile presiunii barometrice și folosirea corelațiilor existente între fenomenele meteorologice și variațiile presiunii atmosferice la nivelul solului pentru previziunea timpului, previziune care, trei secole mai tîrziu, rămîne încă destul de incertă.

Dar Pascal, teoretician profund, a sesizat limpede legătura dintre legile presiunii atmosferice pe care le verificase și legile mai generale ale echilibrului fluidelor. Cîțiva ani după experiența de la Puy de Dôme, în 1653, a dezvoltat, într-o formă care rămîne și astăzi în întregime valabilă, principiile generale ale hidrostaticii, în două lucrări intitulate *Traité de l'Équilibre des liqueurs* și *Traité de la Pesanteur de la masse d'air*. În aceste scrieri găsim în speță enunțul principiului pe care îl numim și azi „principiul lui Pascal" și teoria presei hidraulice care, permițînd ridicarea unei greutăți mari cu ajutorul unei forțe mici, este analogul

hidrostatic al pîrghiei. El a tras de aici concluzia că „ceea ce se cîştigă în forţă, se pierde în viteză“, enunţ care poate fi considerat ca un caz particular al principiului general al conservării energiei, principiu a cărui descoperire în întreaga lui generalitate era rezervată secolului al XIX-lea.

În 1653, în vîrstă de 30 de ani, Pascal se află în acea perioadă a vieţii sale care a fost denumită „perioada mondenă“, deşi este foarte probabil ca această „mondenitate“ să nu fi fost decît relativă. Are ca prieten pe cavalerul de Méré, un bărbat inteligent, dar destul de uşuratic, foarte preocupat de problemele pe care le pun jocurile de noroc, cărora li se deda excesiv. El semnalează atenţiei lui Pascal unele din aceste probleme. Şi iată-l pe acest mare spirit, care, angajîndu-se pe o cale cu totul nouă, pune bazele calculului probabilităţilor, această mare disciplină matematică pe care o vor dezvolta ulterior Huygens, Bernouilli şi, mai tîrziu, Laplace şi Henri Poincaré. Pascal nu a publicat nimic referitor la calculul probabilităţilor, dar a studiat problemele pe care i le pusese Méré şi le-a dat soluţii în scrisorile adresate prietenului său Fermat. Fără îndoială că studiul acestei „geometrii a norocului“, cum se spunea atunci, l-a condus pe Pascal să scrie în 1654 *Traité du triangle arithmétique* în care, introducînd un tablou al numerelor de formă triunghiulară, arată diferite proprietăţi mai mult sau mai puţin ascunse ale acestora, deducînd de aici formule care au rămas fundamentale în algebră şi în calculul probabilităţilor. Alte mici tratate, scrise fără îndoială cam în aceeaşi epocă, dar publicate mai tîrziu, conţin o întreagă serie de foarte remarcabile rezultate de aritmetică, de algebră şi de analiză.

Anul 1654 este un an de reorientare în viaţa lui Pascal. El este încă foarte tînăr, are doar 31 de ani, dar a realizat în cîţiva ani o operă ştiinţifică de o originalitate şi de o importanţă extraordinare, lucru cu atît mai remarcabil cu cît avea o sănătate şubredă şi era încercat mereu de diverse dureri. În acest an a suferit un fel de criză interioară şi,

în urma faimoasei „nopți de foc“ din 19 decembrie 1654, preocupările de ordin metafizic, religios și mistic ocupă în mintea lui primul loc. În decursul celor opt ani pe care îi mai avea de trăit pînă la 19 august 1662, va fi aproape exclusiv omul de la Port-Royal, autorul *Provincialelor* și *Cugetărilor*. Pare a se îndepărta de cercetările științifice, care pînă atunci ocupaseră în viața sa un loc atît de mare. Totuși, nu le părăsește cu totul și continuă în special să corespondeze cu savanți prieteni asupra problemelor calculului probabilităților. Și deodată, în 1658, țîșnesc ca o jerbă finală a focului de artificii al gîndirii științifice pascaliene cercetările asupra ruletei. Pe atunci „ruletă“ se numea curba pe care astăzi o numim „cicloidă“: este curba descrisă de un punct al obezii unei roți care se învîrtește fără alunecare pe un plan orizontal. Se spune că, în urma unor dureri de dinți de la care căuta să se distragă, Pascal își pune o întreagă serie de probleme privitor la această curbă și deschide un concurs public pentru a vedea cine va ști să le rezolve. Acei care se hazardează să răspundă întrebărilor puse de Pascal eșuează toți, mai mult sau mai puțin, dar el le dă soluția și în tratatul său despre ruletă, ultima străfulgerare a geniului său științific, întrebuințează pentru aceasta metode preluate din teoria indivizibilelor a lui Cavalieri și, prin profunzimea vederilor pe care le dezvoltă, merită a fi considerat ca unul dintre marii precursori ai analizei infinitezimale, căreia în curînd, pe căi diferite, Leibniz și Newton îi vor pune bazele definitive.

După această privire generală asupra operei științifice a lui Blaise Pascal, aș vrea să prezint acum cîteva observații cu privire la această operă atît de strălucită și de variată.

Trebuie să subliniem, în primul rînd, că Pascal a deschis gîndirii științifice căi în întregime noi în multiple direcții. În geometrie, rămînînd pe linia geometriei grecilor și fără a se asocia procedeelor analitice ale lui Descartes, a folosit metode directe,

care au condus la toate dezvoltările moderne ale geometriei proiective. El a fost primul care a conceput și realizat o mașină aritmetică, prototip al acelor mașini de calculat a căror utilizare a constituit în ultimii ani pentru cercetările științei contemporane un auxiliar de o putere nemaiauzită. În fizică, Pascal a așezat pe baze solide întreaga hidrostatică, adică știința echilibrului fluidelor, și a demonstrat, în admirabile experiențe, care este adevărata cauză a fenomenelor barometrice. În experiențele pe care le-a efectuat el însuși și în acelea de la Puy de Dôme, pe care le-a condus de la distanță, s-a arătat ca adevăratul fondator al metodei experimentale moderne. Într-o cu totul altă direcție, a fost cel dintîi care a întrevăzut principiile fundamentale ale calculului probabilităților, calcul care formează astăzi una din ramurile cele mai importante ale științei, cu aplicații nenumărate. În sfîrșit, în studiile sale asupra cicloidei, el a știut, primul, să arate, într-un caz particular, puterea metodei care avea să devină în curînd analiza infinitezimală. El completa astfel prețioasele contribuții pe care le adusese deja aritmeticii, algebrei și analizei.

Opera științifică a lui Pascal este, așadar, admirabilă din toate punctele de vedere: i s-au putut, totuși, adresa unele critici. Pascal a abordat și rezolvat în mod magistral numeroase probleme importante: a lăsat astfel amprenta geniului său asupra mai multor ramuri ale științei, dar niciodată n-a perseverat în nici una din ele. Dacă ne putem exprima astfel, în grădina științei a zburat „din floare în floare". Cauzele sînt ușor de înțeles. În primul rînd, avea o constituție fizică slabă și bolnăvicioasă, fiind mereu încercat de diverse crize, ceea ce nu-i permite un efort perseverent. Apoi, însuși geniul său avea, ca o a două fațetă, o curiozitate universală, o permanentă neliniște în fața necunoscutului, ceea ce îl antrena necontenit în direcții noi. De aceea și-a lăsat toate operele oarecum neterminate: geometria proiectivă, al cărei presentiment îl avusese, nu a fost constituită decît

la un secol și jumătate după moartea sa; dacă a pus pe baze solide hidrostatica, le-a lăsat altora grija de a face studiul mai general al mișcării fluidelor; dacă a fost părintele calculului probabilităților, le-a lăsat, de asemenea, altora sarcina de a constitui din el un corp de doctrină coerent; în sfîrșit, dacă a sesizat în mod genial unele din concepțiile calculului infinitezimal, Newton și Leibniz au fost cei cărora le aparține gloria de a fi făcut din el o nouă ramură principală a științei matematice. Și dealtfel, așa cum foarte bine a remarcat Pierre Humbert, nu trebuie să-i judecăm pe oamenii de știință ai secolului al XVII-lea după aceleași norme ca pe savanții de astăzi. Aceștia din urmă, în general profesori sau cercetători, sînt aproape toți „profesioniști", de la care este firesc să ne așteptăm să se consacre elaborării continue și completării operei lor: savanții contemporani cu Pascal erau dimpotrivă, aproape toți „amatori", avînd profesi și ocupații variate, care, din cînd în cînd, cu ma mult sau mai puțin succes, studiau problemele care adeseori din întîmplare, le atrăgeau curiozitatea Blaise Pascal a fost și el un amator în materie de știință, un amator de geniu, și nu-i putem reproșa de a nu fi aparținut timpului său.

Aș mai vrea să insist asupra unui alt aspect al personalității atît de complexe și bogate a lui Pascal. El, care în domeniul filozofiei și al metafizicii a fost un gînditor atît de profund, el, care în știință a fost un teoretician atît de mare, a știut ocazional să arate că era capabil să se intereseze de probleme foarte concrete și să rezolve chestiuni esențialmente practice. Este inexact, fără îndoială, că ar fi inventat roaba, care exista înaintea lui, și poate că este îndoielnic că, avînd, din motive de comoditate, ideea de a-și lega ceasul la mînă, ar fi fost, ceea ce ar fi, într-adevăr, foarte curios, inventatorul ceasului-brățară. Este însă cert, așa cum am văzut, că el a contribuit personal, cu o mare îndemînare tehnică, la realizarea mașinii aritmetice și că a montat cu un talent incontestabil de experimentator, în ciuda insuficienței mij-

loacelor de care dispunea, celebrele sale experiențe asupra presiunii aerului. Și nu este oare el cel care, în ultimele luni ale vieții sale, a avut ideea de a organiza la Paris un serviciu de vehicule publice, trăsurile de cinci bani, care, pentru un preț modic, puteau transporta rapid pe cetățeni de la un punct la altul al capitalei? Această creație, care îi este datorată lui, a funcționat după moartea sa un oarecare număr de ani. Ulterior, trăsurile de cinci bani au dispărut și abia după mai bine de un secol, în timpul Restaurației, au reapărut acele trăsuri cu cai, publice și cu plată, pe care cei mai vîrstnici dintre noi le-au mai văzut circulînd la Paris sub denumirea de omnibuze. Nu este oare, într-adevăr, curios că Blaise Pascal, autorul *Cugetărilor*, să fie acela care a fost în Franța primul promotor al transportului în comun?

Aș vrea să termin printr-o ultimă remarcă. În domeniul filozofic și literar, cartea care a făcut îndeosebi nemuritor numele lui Blaise Pascal este *Cugetările*. Dar această operă, atît de emoționantă, atît de unică în genul ei în literatura mondială, ar fi scris-o oare Pascal în același fel dacă n-ar fi avut în urma sa un întreg trecut de om de știință? Printre frazele dense, uneori de o construcție gramaticală stranie, ale *Cugetărilor*, vedem adesea țîșnind ca niște fulgere scînteietoare imagini impresionante cărora numai creierul unui om de știință genial le putea da naștere. Cînd Pascal exclamă: „Tăcerea eternă a acestor spații infinite mă înspăimîntă"[1], nu-l simțim oare pe omul care cunoaște recentele cuceriri ale astronomiei timpului său și care, în urma lui Kepler și Galilei, vede cu spaimă deschizîndu-se în fața sa insondabilele profunzimi ale cerurilor? În celebrul pasaj despre arahnidă, care începe cu cuvintele: „Ce înseamnă un om în infinit?..."[2], Pascal nu este oare fizicianul care presimte infinita complicație a structurilor

---

[1] Blaise Pascal, *Cugetări*, Editura științifică, București, 1967, p. 103.

[2] Blaise Pascal, *op. cit.*, p. 6.

celor mai fine ale universului fizic și care simte deja cu neliniște spiritul său șovăind în pragul universului atomic? Și atunci cînd scrie: „Distanța infinită de la corpuri la spirite simbolizează oare distanța infinit mai infinită de la spirite la caritate", nu recunoaștem noi oare pe matematicianul care, printre primii, a reflectat profund asupra ordinelor respective de infinitudine a diverselor mărimi? În sfîrșit, celebrul argument al pariului, asupra căruia s-a discutat atît, nu s-a prezentat oare, în mod firesc, minții aceluia care a fost primul promotor al calculului probabilităților? S-ar putea înmulți exemplele de acest fel. Da, într-adevăr, în splendida ei bizarerie, cartea sa *Cugetările* nu putea fi decît opera unui genial om de știință.

Doamnelor, domnilor,

La trei secole de la moartea lui Blaise Pascal, după atîtea studii consacrate personalității și operei sale, nu am terminat încă cu inventarul și analiza tuturor scăpărărilor orbitoare pe care le-au proiectat nenumăratele fațete ale acestei luminoase inteligențe, ale acestui spirit prodigios, ale acestui „geniu înspăimîntător", cum a spus Chateaubriand.

GALILEI ȘI ZORILE ȘTIINȚEI MODERNE[1]

La 15 februarie 1564, cu trei zile înaintea morții lui Michelangelo, se năștea la Pisa Galileo Galilei, considerat, pe bună dreptate, ca unul dintre principalii reprezentanți ai marii revoluții intelectuale, ultimul rod al Renașterii, din care avea să pornească întreaga știință modernă. Patru secole s-au scurs de atunci și, cu toate că ne este foarte greu să ne transpunem în starea de spirit a oamenilor de știință din acea vreme, nu ne putem reprezenta, fără emoție, ce efort intelectual și ce forță sufletească i-au trebuit lui Galilei și emulilor săi pentru a smulge din mintea lor prejudecăți seculare și pentru a opera sfîșietoarea revizuire a concepțiilor tradiționale, revizuire care, singura, putea să le permită să vadă natura cu ochi noi.

Galilei era fiul unui gentilom florentin nu prea bogat, om instruit, care, ca matematician și umanist în orele sale de răgaz, scrisese o lucrare bine apreciată de istorie a muzicii. Tînărul Galilei și-a făcut studiile la Pisa: foarte inteligent și muncitor meticulos, a fost curînd remarcat de profesorii săi, ale căror opinii, bazate încă în genere pe învățăturile scolasticii și pe autoritatea lui Aristotel, nu le împărtășea întotdeauna. Îl interesau mult științele și în mod deosebit mecanica și aplicațiile ei. La

[1] Conferință ținută la Palatul Descoperirilor, la 24 octombrie 1964.

această perioadă a vieții sale petrecută la Pisa se referă două anecdote citate adeseori, a căror exactitate este foarte îndoielnică, dar care au avantajul de a evoca pentru noi unele monumente frumoase din orașul unde locuia. Se spune că în celebrul Dom din Pisa, Galilei, observînd oscilația unei lămpi suspendate de boltă, ar fi avut ideea că mișcarea unui pendul este izocronă. Lăsînd să cadă obiecte de natură diferită de la ultimul etaj al faimosului turn înclinat, el ar fi verificat că, sub acțiunea gravității, toate corpurile cad în același fel. Evident — repet — aceste anecdote sînt probabil lipsite de bază istorică, dar sînt atît de pitorești, încît e plăcut să li se perpetueze amintirea.

Galilei, care studiase cu atenție operele marilor savanți ai antichității, și în special ale lui Euclid și Arhimede, dobîndise de timpuriu o mare notorietate ca matematician în cercurile științifice din Pisa, pînă-ntr-atît, încît în 1589, la vîrsta de 25 de ani, era profesor de matematică la universitatea din orașul său natal. Și în lecțiile sale de mecanică introducea deja idei noi, puțin conforme cu acelea ale lui Aristotel, și reacționa împotriva metodelor de raționament prea verbale ale scolasticii.

Lăsînd pentru ceva mai tîrziu analiza operei lui Galilei, vom continua să-i urmărim cariera. În 1592, poate fiindcă opoziția sa față de ideile tradiționale îi produsese la Pisa unele dificultăți, a părăsit catedra de matematică spre a ocupa la Padova o catedră analogă. La Padova își continuă lucrările de mecanică, studiază magneții și începe să se intereseze de lunete și de folosirea lor în astronomie. În 1609, un nou duce de Toscana, care fusese elevul său, îl recheamă la Pisa și îl face într-un fel consilierul său științific la Florența. De aici, se duce adeseori la Roma și devine membru al Academiei dei Lincei. În această perioadă inventează luneta care îi poartă numele și își dezvoltă observațiile astronomice. Tot în acea vreme, abandonînd din ce în ce mai mult concepțiile tradiționale ale școlii, aderă deschis la ideile lui Copernic

și, încetînd a considera Pămîntul ca imobil în centrul universului, el admite că acesta descrie o orbită în jurul Soarelui și că se învîrtește în jurul axei polilor săi. Asupra acestui din urmă punct însă, este nevoit curînd să se arate prudent, deoarece în 1615, sub pontificatul lui Paul V, inchiziția romană condamnă ipotezele copernicieneși declară eretici pe cei care le propagă. Pierzîndu-l pe protectorul său florentin, care murise de curînd, Galilei consideră oportun să nu se mai ducă la Roma și se retrage într-o mică vilă la Arcetri, în împrejurimile Florenței. Aici, în tăcere și refugiu, el își va continua timp de cincisprezece ani meditațiile și cercetările în mecanică și astronomie.

Din acel moment, și acest lucru este destul de simptomatic, Galilei, poate pentru a avea o mai largă audiență în propria-i țară, renunță să mai scrie în latină, cum făcuse pînă atunci, și începe să-și redacteze cărțile în limba italiană. A depășit acum vîrsta de șaizeci de ani, a reflectat mult asupra mecanicii și astronomiei și fără îndoială ar vrea să pună la punct și să facă cunoscute ideile foarte noi care s-au impus treptat spiritului său. Este foarte probabil ca momentul să-i fi părut propice pentru a le da publicității fără a se expune prea mult fulgerelor inchiziției romane. Avusese, într-adevăr, multă vreme ca amic și admirator pe cardinalul Barberini și acesta urcase de curînd pe tronul pontifical sub numele de Urban al VIII-lea. Fapt este că în 1632 Galilei se decide și publică celebrul său *Dialog asupra celor două sisteme ale lumii, cel al lui Ptolemeu și cel al lui Copernic.* În această lucrare, desemnată în general sub numele de *Dialogo*, primul cuvînt din titlul ei italian, el rezumă sub forma unei convorbiri între trei personaje: Salviati, care este Galilei însuși, Sagredo, care este un prieten cu mintea deschisă, și Simplicio, care, încăpățînat și pedant, simbolizează scolastica și aristotelismul. Va trebui, în cele ce urmează, să mai vorbim despre această lucrare capitală, plină de admirabile intuiții, însoțite de unele grave erori: de peste trei secole, erudiții

n-au încetat să-i studieze și să-i comenteze aproape toate frazele. O asemenea expunere, în care tezele coperniciene erau reafirmate cu vigoare, nu putea să nu neliniștească inchiziția romană și, din nenorocire, din motive obscure, papa Urban al VIII-lea pare să cam fi uitat prieteniile cardinalului Barberini, așa încît în 1633 Galilei este silit să compară în fața tribunalului inchizitorilor care pronunță împotriva sa o condamnare severă și îl obligă să-și renege public doctrinele cu privire la mișcarea Pămîntului. Bătrîn și bolnav, Galilei se supune și, poate grație intervenției papei, nu are de suferit decît o captivitate destul de scurtă, mai întîi la Roma, apoi la Florența, înainte de a fi autorizat să-și reia vechea sa reședință de la Arcetri unde trebuie să locuiască supus în permanență unei supravegheri destul de stricte. Aici, în singurătatea atenuată doar de devotamentul cîtorva elevi, doborît de vîrstă și de infirmități (devine orb în 1637), el continuă să lucreze cu îndîrjire și — măreț exemplu al unui bătrîn care, sub loviturile vîrstei, își păstrează întreaga sa luciditate de gîndire — publică în 1638 o nouă punere la punct a ideilor sale asupra mecanicii, sub titlul de *Discursuri și demonstrații matematice relative la două științe noi*. Această lucrare remarcabilă, cunoscută sub numele prescurtat de *Discorsi*, arată, atunci cînd e comparată cu *Dialogo*, cît de mult progresaseră în cîțiva ani concepțiile sale, aducîndu-l în pragul a ceea ce avea să devină, datorită lui Descartes, lui Huygens și mai ales lui Newton, mecanica clasică. Galilei a murit la Arcetri în 1642, în vîrstă de 78 de ani.

*

* *

Ne vom îndrepta acum atenția spre opera științifică a lui Galilei pentru a arăta întreaga ei valoare și admirabila originalitate. Această operă poate fi împărțită în două părți bine distincte: lucrările sale de mecanică, pe care le-a desfășurat realizînd progrese permanente în tot cursul vieții sale, și

lucrările privind instrumentele optice și utilizarea lor pentru observațiile astronomice. Cu toate că cercetările lui Galilei referitoare la mecanică sînt, incontestabil, partea cea mai importantă a operei sale în ceea ce privește istoria gîndirii științifice, voi începe expunerea de față cu studiile sale asupra lunetelor și a întrebuințării lor în astronomie. Într-adevăr, aceste studii formează în opera lui Galilei un ansamblu bine definit și nu l-au preocupat decît o perioadă destul de scurtă din viața sa, vreo cincisprezece ani cu începere cam din 1610. Ne va fi ușor să luăm rapid cunoștință de ele, pe cînd examinarea descoperirilor lui Galilei în mecanică și a evoluției gîndirii sale în acest domeniu dificil va cere dezvoltări mai ample.

Galilei nu a fost inventatorul nici al lentilelor, nici al lunetelor de apropiere, nici al microscopului (nici măcar, într-un alt domeniu, al termometrului, așa cum s-a susținut uneori). Proprietățile lentilelor erau cunoscute de foarte multă vreme: chiar în antichitate se avea, fără îndoială, o oarecare idee despre ele, iar de la sfîrșitul Evului mediu oamenii se serveau în mod curent de ele pentru corectarea prezbitismului și a miopiei. Cît despre combinațiile de lentile care furnizează lunete de apropiere sau microscoape, se pare că ele ar fi fost descoperite în Olanda încă din primii ani ai secolului al XVII-lea: în legătură cu aceasta, se pun probleme spinoase de prioritate, pe care le voi lăsa în grija eruditilor să le discute. Ceea ce este cert, e că în jurul anului 1610 Galilei a avut cunoștință de fabricațiile de lunete efectuate în Olanda și că a avut ideea foarte simplă, dar genială la acea epocă, de a le folosi pentru observarea astrelor. A fost o zi decisivă în istoria astronomiei aceea cînd Galilei a observat în luneta sa tot felul de detalii complet ignorate pînă atunci de astronomi și pe care o mărire chiar foarte modestă (de douăzeci pînă la treizeci de ori) îi permitea să le vadă distinct. Dar, înainte de a enumera descoperirile pe care le-a făcut astfel și care au părut

contemporanilor săi atît de extraordinare, trebuie să amintesc că, dacă Galilei nu a inventat lunetele, cel puțin a inventat și a construit el însuși un nou tip de lunetă care-i poartă încă numele: luneta lui Galilei are ca obiectiv o lentilă convergentă, ca ocular o lentilă divergentă, dă o imagine dreaptă, adică nu răsturnată, a unui obiect îndepărtat, iar descrierea și studiul ei pot fi găsite și astăzi în toate tratatele despre instrumentele optice.

Și acum, ce a văzut oare Galilei observînd astrele prin lunetele sale? El a văzut pe suprafața Lunii munți a căror înălțime a putut-o măsura aproximativ. A văzut pe Soare pete avînd o formă și o distribuție variabile. A observat patru din cei doisprezece sateliți ai lui Jupiter, învîrtindu-se în jurul acestei planete (ceilalți opt sînt prea mici pentru a-i fi putut vedea prin luneta sa). A observat fazele planetelor Venus și Marte, precum și variațiile diametrului aparent al acestui din urmă astru. A văzut cu surprindere planeta Saturn sub forma unui glob purtînd lateral un fel de toarte de formă variabilă, a căror natură nu a reușit să și-o explice: a trebuit să se aștepte încă mulți ani pentru ca aceste aparențe stranii să fie corect interpretate de Huygens, atunci cînd acesta a identificat celebrul „inel al lui Saturn". Depășind limitele sistemului solar, Galilei și-a dat seama că Calea lactee este alcătuită dintr-o puzderie de stele. Toate descoperirile sale, pe atunci atît de surprinzătoare, savantul italian le-a făcut cunoscute într-o serie de publicații, dintre care prima a fost, începînd din 1614, *Nuntius Sidereus*.

Ne putem astăzi închipui stupoarea contemporanilor lui Galilei cînd au luat cunoștință de revelațiile pe care le aducea oamenilor simpla explorare a cerului cu ajutorul unei modeste lunete; pînă atunci astrele erau considerate ca existențe perfecte și imuabile, ţinte de aur detașîndu-se pe bolta cerească. Și iată că ele apăreau deodată ca afectate de imperfecțiuni și de variații, supuse unor evoluții asemănătoare cu acelea ale obiectelor terestre. Se

spune că unii refuzau să privească prin lunetele lui Galilei, neputîndu-se decide să abandoneze ideile tradiționale despre imutabilitatea cerurilor.

E cert că aceste remarcabile descoperiri cerești l-au condus pe Galilei să reflecteze profund asupra sistemului universului și să adere din ce în ce mai hotărît la ideile lui Copernic privind mișcările Pămîntului în jurul Soarelui și în jurul axei sale. Dacă Jupiter este înconjurat de sateliți care se învîrtesc în jurul lui, nu trebuie oare să credem că planetele înseși se învîrtesc în jurul acelui astru care le luminează pe toate și care este Soarele? Putem oare admite că toate stelele se învîrtesc în douăzeci și patru de ore în jurul Pămîntului cu viteze care, din cauza depărtării lor, ar trebui să fie vertiginoase? Pornind de la observațiile sale astronomice, Galilei a luat poziție pe față pentru sistemul universului al lui Copernic. Aceasta explică prima lui condamnare, în 1616, apoi, cînd a avut îndrăzneala să-și susțină și mai deschis ideile în *Dialogo*, severa condamnare personală care îl lovește în 1633. Dar, în ciuda aparentei sale retractări, a păstrat în gînd toată viața — chiar dacă, fără îndoială, n-a pronunțat-o deschis — celebra frază: „*E pur si muove*" („Și totuși (Pămîntul) se mișcă").

Observațiile astronomice ale lui Galilei au avut o importanță capitală. Astăzi ele ne apar ca fiind destul de restrînse și de la sine înțelese. Dar ele au fost acelea care au declanșat toate progresele ulterioare ale astronomiei. Inspirîndu-se de la ele, toți curioșii cerului explorează, cu ajutorul unor instrumente din ce în ce mai perfecționate, adîncimile universului. Lunetele mari, telescoapele uriașe, dispozitivele de telescopie electronică ale compatriotului nostru André Lallemand nu sînt în fond decît prelungirile gestului pe care l-a făcut Galilei în 1610, cînd a îndreptat către obiectele cerești modesta sa lunetă. Din acest punct de vedere, Galilei poate fi considerat promotorul întregii astronomii moderne.

Dar oricare ar fi importanța capitală a observațiilor astronomice ale lui Galilei, din punctul de vedere al ideilor științifice generale opera sa în mecanică a fost cea mai esențială. Pentru a putea aprecia originalitatea și importanța ideilor lui Galilei în acest domeniu, este necesar să examinăm care erau ideile care prevalau atunci cînd și-a început el cariera.

Se știe că în cursul evului mediu, mai ales cu începere din secolul al XIII-lea, învățăturile marilor reprezentanți ai scolasticii se sprijineau aproape exclusiv pe ideile filozofice și științifice dezvoltate cu mai bine de trei secole înaintea erei noastre de către Aristotel. Așa stăteau lucrurile în special în privința mișcării corpurilor în lumea fizică. Principiile mecanicii lui Aristotel, care astăzi ne par complet false, pentru oamenii antichității și ai evului mediu puteau totuși să pară că decurg direct din observația de fiecare zi. Pe de o parte, știm toți că la suprafața pămîntului toate corpurile grele, corpurile grave cum se spunea altădată, dacă sînt lăsate în voia lor, tind să cadă vertical și avem impresia că, dacă nimic n-ar împiedica căderea lor, această cădere ar continua neîntrerupt, pînă cînd ar atinge centrul pămîntului. Pe de altă parte, știm de asemenea că un corp lansat în mod artificial ca o bilă pe o masă de biliard primește o mișcare inițială mai mult sau mai puțin rapidă, dar că această mișcare nu întîrzie să se încetinească și chiar să se oprească. Aristotel crezuse că exprimă aceste fapte experimentale incontestabile admițînd că există două feluri de mișcări: mișcările naturale și mișcările violente. Mișcarea naturală ar fi aceea a unui corp grav, care cade vertical, ea ar fi o mișcare accelerată și în principiu ar putea continua pînă cînd corpul ar atinge centrul pămîntului. Aristotel spunea că un corp grav tinde către „locul natural" al său, loc care este centrul pămîntului. Cu totul diferită ar fi mișcarea violentă:

ea ar fi comunicată unui corp de către un „motor", însă viteza astfel dobîndită de corp nu s-ar putea menţine decît dacă ar fi permanent întreţinută de o anumită acţiune exterioară. Aristotel credea că dacă corpul proiectat păstrează un anumit timp mişcarea sa violentă, este fiindcă primeşte de la aerul înconjurător un anumit impuls care îi menţine o anumită viteză. S-ar fi putut obiecta că în acest caz nici o mişcare violentă n-ar putea avea loc în vid; dar Aristotel, care nu credea în existenţa vidului, ar fi răspuns fără îndoială că există întotdeauna în jurul unui mobil un mediu oarecare susceptibil de a-i întreţine mişcarea. Dealtfel, în dinamica aristotelică această întreţinere nu durează niciodată la infinit şi mişcarea violentă sfîrşeşte întotdeauna prin a se opri. Timp de mai multe secole, scolastica a încercat să interpreteze toate fenomenele mecanice pe aceste baze. În această încercare, ea se lovea în permanenţă de mari dificultăţi, chiar în cazul unui proiectil lansat vertical în sus sau oblic în cîmpul de gravitaţie, căci deja, în acest caz simplu, trebuia evident să se combine o mişcare naturală cu una violentă. Mulţumindu-se cu explicaţii verbale şi nerecurgînd niciodată la controlul prin experienţă, mecanica scolastică nu făcuse nici un progres real.

Dar cum istoricii ştiinţelor şi-au dat seama treptat de acest lucru, şi mai ales în urma celebrelor lucrări ale lui Pierre Duhem, spre sfîrşitul evului mediu, la Universitatea din Paris, mai ales, se produsese o oarecare reacţie împotriva doctrinelor lui Aristotel şi a manierei sale de a considera natura mişcărilor. Încă din secolul al XIV-lea, Jean Buridan, care a fost rectorul Universităţii din Paris în 1327 şi care nu este numai autorul celebrei fabule în care vedem un măgar, victima nehotărîrii sale, murind de foame între două legături de fîn, a avut îndrăzneala să introducă în mecanică o idee cu totul diferită de aceea a lui Aristotel. Pentru el, atunci cînd un motor comunică o mişcare unui corp, îi furnizează ceva care rămîne legat de corp şi îi întreţine viteza: acest ceva, Buridan

îl desemnează prin cuvîntul latin *impetus*. Dacă n-ar mai fi deci mediul exterior care ar întreține viteza corpului, această viteză ar avea tendința de a se menține fiindcă ar rezulta de pe urma a ceva ce motorul a cedat corpului. Aceasta este valabil în cazul mișcărilor violente: pentru mișcările naturale Buridan crede că greutatea este aceea care comunică permanent corpului grav în cădere liberă un *impetus* care crește, ceea ce i se pare că explică faptul că mișcarea naturală este accelerată. Doctrina *impetus*-ului, adăugînd corpului o mărime ce depinde de starea lui de mișcare și pe care corpul o transportă cu sine, a marcat un pas foarte important pe calea care trebuia să ducă la mecanica clasică: *impetus*-ul rămînea, desigur, o noțiune destul de vag definită, dar era mai aproape de mecanica noastră modernă decît de aceea a lui Aristotel, ea era, evident, înrudită cu mărimile pe care le numim astăzi energie și cantitate de mișcare.

În momentul Renașterii, dinamica lui Aristotel și teoria *impetus*-ului fuseseră predate concomitent, fără ca de aici să rezulte vreun progres decisiv. S-a încercat chiar concilierea lor, presupunîndu-se că *impetus*-ul este comunicat mobilului nu de către motor, ci de către mediul înconjurător. O teorie hibridă de acest gen preda la Pisa filozoful Bonamico pe vremea cînd Galilei era unul din elevii săi. Încă din prima sa tinerețe Galilei se interesează de mecanică și există o lucrare a sa intitulată *De Motu*, scrisă la 25 de ani, cam prin 1590. Deși destul de reticent față de doctrinele lui Aristotel, el rămîne încă foarte impregnat de învățăturile scolastice: admite noțiunea de *impetus*, dar admite, de asemenea, ca și discipolii lui Buridan, că într-o mișcare violentă *impetus*-ul se împrăștie de la sine. În această carte din tinerețe, în care autorul utilizează permanent procedeele de raționament specioase ale scolasticii, nimic nu prevestește deocamdată că el va fi marele înnoitor al mecanicii.

Nu se cunoaște foarte exact cum au evoluat concepțiile lui Galilei în cursul celor șaptesprezece

ani pe care i-a petrecut la Universitatea din Padova. Fără îndoială el știa deja că, după cum reiese din *De Motu*, căderea unui corp într-un mediu material omogen depinde de densitatea *relativă* a corpului în raport cu mediul. Și dacă este cumva ceva adevărat în anecdotele legendare relative la Dom și la turnul înclinat din Pisa, el poseda deja unele cunoștințe precise despre legea căderii corpurilor grave și recunoscuse izocronismul oscilațiilor unui pendul, fără să-și dea seama de faptul, semnalat mult mai tîrziu de Huygens, că acest izocronism nu e valabil decît pentru oscilațiile mici. Ceea ce este însă sigur, e că, într-o scrisoare adresată lui Sarpi la 16 octombrie 1604, Galilei anunță că a verificat experimental rezultatul următor: în căderea unui corp grav, spațiile parcurse în intervale de timp egale și succesive, pornind de la punctul de plecare, sînt proporționale cu succesiunea numerelor impare. Aceasta înseamnă că spațiile parcurse sînt proporționale cu pătratul timpilor, ceea ce noi exprimăm astăzi prin formula $z = \frac{1}{2} gt^2$, variabila z fiind socotită după verticala descendentă. Galilei descoperise astfel o importantă lege a dinamicii căderii corpurilor: din nefericire, el credea de asemenea că poate să afirme că viteza corpului este în fiecare moment proporțională cu spațiul parcurs, pe cînd în realitate ea e proporțională cu durata de cădere și, prin raționamente geometrice inexacte, el se străduia să demonstreze compatibilitatea acestei ipoteze cu legea exactă a căderii pe care tocmai o descoperise. El a persistat mult timp în această eroare, deoarece o regăsim încă în *Dialogo*, și a rectificat-o abia la sfîrșitul vieții în *Discorsi*, arătînd că viteza căderii trebuie să crească asemenea timpului scurs de la începutul ei.

Ideile lui Galilei cu privire la mecanică sînt expuse în lucrări, dintre care principalele sînt un discurs despre hidrostatică, publicat la Florența în 1612, și *Dialogo*, din 1632, urmat de *Discorsi*, din 1638, despre care am vorbit deja și în care

ideile autorului sînt prezentate sub forma unei convorbiri între cei trei interlocutori Salviati, Sagredo şi Simplicio. Nu putem urmări aici în amănunt aceste texte, care conţin o mulţime de repetiţii, digresiuni şi uneori erori. Esenţialul este de a vedea degajîndu-se din ele, puţin cîte puţin, cu greutate şi cu preţul unei veritabile lupte intelectuale, unele dintre principiile care în curînd vor servi ca bază mecanicii clasice.

În ce priveşte statica, Galilei a făcut numeroase observaţii în general exacte şi importante, dar care nu erau în întregime noi, căci această ramură a ştiinţei se îmbogăţise deja cu contribuţii decisive datorate savanţilor Renaşterii şi îndeosebi ilustrului olandez Simon Stevin. El a enunţat într-un mod precis principiul general, deja cunoscut, al scolasticilor, care pe atunci era denumit principiul vitezelor virtuale şi pe care astăzi îl numim de preferinţă „principiul lucrului virtual": el l-a ilustrat cu exemple bine alese, care implică aplicarea legii de compunere a forţelor, a desprins din el noţiunea de moment al unei forţe, noţiune care a subzistat fără schimbare pînă în zilele noastre şi care pare să fi avut, sub o formă puţin cam confuză, noţiunea de centru de greutate. Întrucît studiase mult, încă din tinereţe, operele lui Arhimede, a dezvoltat într-un mod corect principiile hidrostaticii şi a dat exemple pregnante ale aplicaţiilor lor.

Dar dacă marile legi ale staticii erau deja bine cunoscute înainte de Galilei, nu tot aşa era, precum am văzut, cu legile dinamicii. Îndepărtîndu-se tot mai mult de ideile lui Aristotel, el a folosit destul de frecvent noţiunea de *Impeto* care este traducerea aproximativă în italiană a *impetus*-ului lui Buridan, noţiune pe care el nu reuşeşte s-o definească într-o manieră destul de precisă şi care pare adeseori să se confunde cu aceea de viteză. Uneori i se întîmplă chiar să întrevadă, într-un fel încă prea puţin clar, marea lege a dinamicii clasice, aceea pe care, o jumătate de secol mai tîrziu,

Newton avea s-o enunțe sub forma atît de cunoscută: $F = m\gamma$.

Un mare număr din reflecțiile lui Galilei în statică și în dinamică au avut ca obiect mișcarea pendulului și aceea a corpurilor pe planuri înclinate. El a observat că un pendul, după mișcarea lui de coborîre, urcă din nou întotdeauna la o înălțime care este aproape egală cu înălțimea inițială și a dat despre aceasta exemple instructive și amuzante: el a sesizat bine importanța acestui fapt, pe care îl interpretăm astăzi aplicînd principiul conservării energiei și remarcînd că energia potențială a unui pendul în cîmp gravitațional este proporțională cu altitudinea lui.

Asupra mișcării unui corp greu pe un plan înclinat, Galilei a făcut cu multă pătrundere observații, sprijinite, desigur, pe experiențe, care aveau o mare importanță pentru mecanica acelei epoci. Lăsînd să alunece bile pe planuri înclinate, ale căror înclinări față de orizontală erau diferite, el a constatat că accelerația corpului scade odată cu înclinarea și, printr-o intuiție genială, a ajuns la concluzia că în mișcarea unei bile pe un plan orizontal viteza trebuie să rămînă constantă la infinit. El obținea astfel un prim enunț al principiului inerției pe care se bazează întreaga mecanică modernă. De aceea majoritatea autorilor l-au considerat și îl consideră pe Galilei ca părintele mecanicii moderne. Totuși, această opinie nu este unanim acceptată. Eminentul istoric al științelor Al. Koyré a emis în remarcabilele sale *Études galiléennes* îndoieli în această privință. El a observat că Galilei n-a putut niciodată să se desprindă complet de concepțiile scolasticii în care fusese format în tinerețe. În special, n-a putut să conceapă niciodată un corp care să nu fie supus cîmpului gravitațional: el s-a simțit încurcat de faptul că un corp care alunecă pe un plan orizontal tangent la sfera terestră este peste tot, în afara punctului de tangență, supus unei componente orizontale a gravitației și pare a fi fost înclinat să conchidă că un astfel de corp n-ar putea avea o viteză constantă

decît dacă ar rula pe o sferă avînd centrul în centrul pămîntului, concepţie care, evident, altera adevărata natură a principiului inerţiei. După Koyré, Descartes ar fi fost cel care, primul, a enunţat principiul inerţiei în toată generalitatea lui şi dacă a putut-o face a fost fiindcă spiritul său rigid şi abstract îi permisese ca, eliberîndu-se de toate concepţiile scolastice, să ajungă să conceapă un corp în întregime izolat în univers şi, ca urmare, sustras gravitaţiei, înconjurat de un spaţiu cu adevărat „vid", adică lipsit de orice proprietate fizică. Pare cert că era nevoie, într-adevăr, să se ridice la acest grad de abstracţie pentru a putea să enunţe principiul inerţiei în toată generalitatea lui. Menţionăm totuşi, în treacăt, că această viziune abstractă nu ni se pare astăzi să poată corespunde riguros realităţii fizice, deoarece, pe de o parte, teoria relativităţii generale a lui Einstein nu pare deloc compatibilă cu imaginea unui corp în întregime izolat în univers şi lipsit de orice proprietate gravifică, iar, pe de altă parte, dezvoltarea fizicii cuantice ne determină tot mai mult să credem că ceea ce numim vid este în realitate întotdeauna sediul unor proprietăţi fizice mai mult sau mai puţin ascunse. Mi se pare că dacă Galilei n-a reuşit, fără îndoială, să enunţe principiul inerţiei sub forma lui precisă şi abstractă, el a trecut însă atît de aproape de acesta, încît e just să-i lăsăm onoarea acestei descoperiri decisive.

Predecesorii lui Galilei îşi făcuseră o idee destul de curios falsă despre mişcarea unui proiectil în cîmpul de gravitaţie. Ei presupuneau că, ieşind din tun cu o mişcare „violentă" şi un mare *impetus*, proiectilul descria mai întîi o traiectorie rectilinie, apoi că, *impetus*-ul lui micşorîndu-se progresiv, traiectoria lui se curba în jos şi că, în sfîrşit, *impetus*-ul fiind epuizat, proiectilul cădea vertical. Deoarece recunoscuse foarte bine cum trebuia să se facă compunerea forţelor şi a mişcărilor, Galilei a expus în *Dialogo* cum trebuie, de fapt, calculată mişcarea unui proiectil combinînd mişcarea lui orizontală, a cărei viteză este constantă, cu miş-

carea verticală, care este accelerată în jos. Profitînd de indicaţiile astfel date de Galilei, Fra Bonaventura, care este cunoscut în istoria ştiinţelor sub numele de Cavalieri, a fost primul care a anunţat că traiectoria unui proiectil în cîmpul gravitaţional, abstracţie făcînd de rezistenţa aerului, trebuie să fie o parabolă. Galilei, care n-ar fi avut de făcut decît un pas în plus pentru a ajunge la această concluzie, a fost dezolat de a se fi lăsat depăşit de colegul său italian.

Atunci cînd, la sfîrşitul vieţii sale, Galilei a recunoscut că viteza de cădere a unui corp greu creşte proporţional cu timpul, atenţia sa a fost atrasă de faptul că în cursul momentelor succesive viteza creşte „cu intervale insensibile". El a ajuns astfel la consideraţii foarte apropiate de acelea pe care exact în acelaşi timp le dezvoltase Cavalieri sub numele de „teoria indivizibilelor" şi se ştie că acest gen de idei a stat la originea naşterii calculului infinitezimal. Nu putem trece sub tăcere nici contribuţiile remarcabile pe care Galilei le-a adus unor probleme de rezistenţă a materialelor şi de flexiune a grinzilor: el a fost, şi aici, un adevărat precursor.

*

* *

Ceea ce am spus pînă acum în această expunere, desigur succintă, ajunge ca să arate cît de admirabile au fost descoperirile lui Galilei în astronomie şi în mecanică. El a rupt vălurile care ascundeau ochilor predecesorilor şi contemporanilor săi aspecte esenţiale ale realităţii fizice, a deschis fără-ncetare căi noi, făcînd astfel posibil progresul rapid al succesorilor săi.

Şi totuşi, acestei atît de frumoase opere i s-au putut adresa unele reproşuri. Este cert că explicaţiile şi demonstraţiile lui Galilei sînt adeseori confuze şi alambicate: forma de dialog pe care le-a dat-o adesea este responsabilă în parte de acest lucru. Nu trebuie să uităm însă cît de precare erau mijloacele de care putea el dispune: ca toţi prede-

cesorii săi, şi chiar ca Huygens mai tîrziu, el întrebuinţează întotdeauna, în toate raţionamentele sale, limbajul geometric: nu are încă la dispoziţia sa supleţea şi precizia analizei infinitezimale. Dacă am fi tentaţi să criticăm şi calitatea observaţiilor şi a experienţelor sale, n-ar trebui să uităm cît de limitat şi defectuos era materialul experimental pe care şi-l putea procura. Cu lunete slabe, abia echivalente cu binoclurile noastre de teatru, el se străduia să scruteze cerurile, şi aceste lunete i-au fost deajuns pentru a face descoperiri senzaţionale. În experienţele sale asupra căderii corpurilor, se lovea de foarte mari dificultăţi pentru măsurarea timpului. Nedispunînd de ceasornice şi de cronometre, a căror construcţie numai lucrările lui Huygens aveau s-o permită în curînd, a trebuit să se mulţumească a măsura duratele cu ajutorul clepsidrelor cu apă, desigur prea puţin precise, sau prin mijlocul, şi mai rudimentar, care consta în numărarea bătăilor pulsului său.

Cu tot respectul pe care îl inspiră opera lui Galilei, nu se poate contesta că el a comis adeseori erori grave. Reflectînd, a parvenit uneori să corecteze unele din ele. Am spus deja că în ultima sa operă, *Discorsi*, el formulase adevărata lege care leagă viteza unui corp în cădere liberă de durata căderii, corectînd astfel legea eronată pe care o propusese mult timp. Cunoscînd, fără îndoială, încă din tinereţe, caracterul aproximativ izocron al oscilaţiilor unui pendul, el a afirmat mult timp că perioada de oscilaţie era proporţională cu lungimea firului de suspensie a pendulului şi această eroare este reprodusă şi în *Dialogo:* dar în *Discorsi* el dă relaţia exactă, după care perioada pendulului variază cu rădăcina pătrată a lungimii firului de suspensie. A mai comis şi alte erori foarte grave pe care nu le-a rectificat niciodată. Aşa, de exemplu, antrenat încă, fără îndoială, de prioritatea pe care o acordau aristotelicienii şi scolasticii mişcării circulare uniforme asupra mişcării rectilinii uniforme (a cărei existenţă li se părea aproape de neconceput), Galilei a atribuit plane-

telor, în teoria sa heliocentrică despre sistemul solar, traiectorii strict circulare. Și acest lucru este, într-adevăr, curios, deoarece cum putea el să nu știe că contemporanul și admiratorul său, Kepler, demonstrase, într-o manieră imposibil de combătut, caracterul eliptic al traiectoriilor planetare? În sfîrșit, Galilei a susținut întotdeauna că mareele erau provocate de rotația Pămîntului și această opinie constituie un regres foarte net, căci numeroși fuseseră cei care își dăduseră seama, înaintea lui Galilei și chiar în antichitate, că fenomenul mareelor era legat mai ales de mișcarea Lunii.

Mai semnalăm că, uneori, bazîndu-se pe un pasaj din *Dialogo*, s-au emis dubii că Galilei ar fi efectuat realmente experiențele despre care vorbește. Aceste dubii nu par a fi întemeiate, căci Galilei a descris adeseori experiențele sale cu atîta precizie și amănunte, încît pare de necrezut să nu le fi executat. Dealtfel, se pare că a avut asupra raporturilor dintre teorie și experiență o opinie conformă vederilor științei moderne. Observația și experiența trebuiau, credea el, să furnizeze bazele teoriilor care se cuveneau a fi adoptate; pe aceste baze trebuiau apoi să fie dezvoltate cu îndrăzneală consecințele teoriei și să se revină în sfîrșit la observație sau la experiență pentru a verifica previziunile astfel obținute. În această manieră de a vedea, Galilei a fost de asemenea un precursor.

*

* *

Să aruncăm acum o privire de ansamblu asupra existenței lui Galilei.

Din multe puncte de vedere se poate considera că ea a avut un caracter destul de dramatic. Galilei a cunoscut mari succese și a făcut descoperiri strălucite care, fără nici o îndoială, i-au adus cele mai vii satisfacții intelectuale, dar a întîmpinat și multe dificultăți, a fost neînțeles și chiar persecutat. Întreaga lui viață a luptat pentru a se desprinde de ideile false care dominau știința din timpul tinereții sale: într-o largă măsură a reușit să se des-

prindă de ele și acest efort greu i-a deschis orizonturi noi, dar n-a ajuns niciodată să șteargă complet din mintea sa prejudecățile epocilor precedente. A cîștigat victorii admirabile, dar ele n-au fost niciodată complete.

Cu ocazia aniversării a patru sute de ani de la nașterea sa, evocăm cu emoție măreața figură a acestui precursor. El s-a străduit mult, fără a ajunge vreodată complet să atingă țelurile pe care le urmărea: a fost constrîns, printr-o nedreaptă condamnare, să-și renege ideile privind sistemul universului, idei care îi erau scumpe și la care nu putea renunța; a murit bătrîn, bolnav, orb, într-o singurătate aproape completă, aproape încarcerat în mica sa vilă din Arcetri. De aceea efortul său îndelungat, victorios și incomplet totodată, ne apare astăzi ca simbolul emoționant al dureroasei nașteri a științei moderne.

CERCETAREA ȘI ÎNVĂȚĂMÎNTUL[1]

Doamnelor, domnilor,

Parcurgînd recent o carte consacrată lui Charles Péguy, am citit o frază scrisă de el acum o jumătate de secol, frază care mi-a reținut atenția. „Nu există nimic atît de opus, scrie Péguy, funcțiilor științei, ca funcțiile învățămîntului, întrucît funcțiile științei cer o perpetuă nelinişte, pe cînd funcțiile învățămîntului cer o certitudine imperturbabilă".

Așadar, Péguy vede un fel de opoziție fundamentală între atitudinea cercetătorului științific, care, prin însăși natura spiritului său, este întotdeauna preocupat de descoperirea unor lucruri necunoscute încă și preferă să pună la îndoială pe cele ce treceau drept bine stabilite, și atitudinea profesorului, care, predînd ceea ce se știe sau se crede că se știe, după un program ce-i este impus sau pe care singur și l-a trasat, tinde, urmînd o înclinare naturală, către un anumit dogmatism.

Este oare această opoziție într-adevăr reală? Aceasta e problema pe care ne-o putem pune. Ceea ce ne-ar putea face să ne îndoim este că gustul pentru cercetare și cel pentru învățămînt există aproape întotdeauna simultan la un același individ, este că, în cursul secolelor și din ce în ce mai mult în timpurile moderne, cercetarea și învățămîntul

[1] Discurs pronunțat la Adunarea generală anuală din 10 iunie 1959 a Societății de sprijinire a prietenilor științei.

de grad superior au fost în permanență unite. După ce a trecut prima tinerețe, în care primează dorința de instruire, apoi cînd imaginația și ardoarea, în toată prospețimea lor, favorizează primele descoperiri, cercetătorul înnăscut, ajuns la maturitate, resimte progresiv dorința de a comunica altora ceea ce a învățat sau inventat și, trecut de vîrsta la care ești elev, aspiră să aibă el însuși elevi. Așa că la ora actuală cea mai mare parte a cercetătorilor științifici sfîrșesc prin a consacra învățămîntului o parte din activitatea lor. Chiar cei care nu fac acest lucru — au fost numeroși altădată, în epoca în care puteai vedea magistrați geometri, ca Fermat, sau financiari chimiști, ca Lavoisier — nu renunță în general să scrie, în afară de memorii specializate în care expun rezultatele cercetărilor lor, lucrări de ansamblu avînd un caracter didactic, ceea ce este de asemenea o formă de învățămînt. Cum se poate atunci vorbi de o opoziție între cercetare și învățămînt dacă una pare să-l atragă pe celălalt, dacă sînt aceiași oameni care le practică pe amîndouă deopotrivă, ca și cum ar fi necesară aici o adevărată simbioză?

Se pot găsi însă și argumente în sens contrar. Este cert că învățămîntul are, prin însăși esența sa, o tendință dogmatică, că tinde să fixeze sub o formă care s-ar vrea definitivă starea, în realitate întotdeauna provizorie, a cunoștințelor noastre. Profesorul nu poate introduce mereu restricții sau îndoieli în afirmațiile sale; ridicînd în fața auditoriului edificiul concepțiilor noastre teoretice privind un subiect sau altul, el nu poate să-i arate mereu fragilitatea. Dacă ar face așa, elevii săi, mai ales dacă sînt foarte tineri, ar avea impresia unei gîndiri care șovăie și și-ar pierde încrederea în autoritatea lui. De cîte ori în cursul lecțiilor sale profesorul nu are impresia că este mai afirmativ în privința rezolvării unor probleme în frazele pe care le pronunță în public decît în reflecțiile sale solitare! În exercițiul prelungit al predării, obișnuința intervine de asemenea într-un mod mai mult sau mai puțin disimulat, obișnuința care face ca gîndirea să se

cristalizeze, care abate de la ideile noi și favorizează instalarea unor contestabile ortodoxii. Este bine cunoscut faptul că foarte mari savanți au împiedicat uneori un timp destul de îndelungat progresele științei refuzînd cu obstinație să admită puncte de vedere noi care, ulterior, s-au dovedit totuși exacte și fecunde. Fără îndoială că aici mai intervine adesea și efectul vîrstei care-l face pe om să rămînă atașat de concepțiile din epoca în care, tînăr fiind, avea loc formarea sa intelectuală. Dar mai este, fără îndoială, în această lipsă de suplețe a gîndirii, consecința unei lungi obișnuințe a predării scrise sau orale care, impunînd întotdeauna să se ia ca baze anumite idei admise, face afirmarea acestora din ce în ce mai intransigentă. Cineva care a repetat în lecțiile sau cărțile sale de atîtea ori „Se știe bine că...", în cele din urmă nici nu mai examinează fundamentele pe care se sprijină această afirmație atît de cunoscută.

Omului nu-i place să se dezică: îți trebuie o mare tărie sufletească pentru a recunoaște că poate te-ai înșelat. Or, învățămîntul obligă neîncetat la opțiuni, la alegerea între opinii opuse și aceasta — în contradicție cu ceea ce cred mulți oameni — chiar în științele cele mai exacte. Or aceste opțiuni ești obligat să le faci în mod public și, atunci cînd le-ai făcut și le-ai răsfăcut, ai o oarecare jenă să te contrazici pe tine însuți, punîndu-le la îndoială: există totuși cazuri în care progresul științei se obține cu acest preț.

Orice om care scrie sau vorbește în public, care este prin urmare obligat să adopte o anumită atitudine față de problemele pe care le tratează, sfîrșește fără voia sa prin a fi prizonierul rolului pe care îl joacă și nu se mai poate elibera de „personajul" pe care îl încarnează. Adeseori, și fără a fi ipocrit, ideile pe care le are în sinea sa, acelea pe care le frămîntă în meditațiile sale solitare, sînt destul de diferite de acelea pe care, din obișnuință sau din obligație profesională, le exprimă în exterior prin viu grai sau în scris. În forul său interior el

rămîne un cercetător care se neliniștește și se îndoiește, pe cînd în exterior el apare ca un magistru sigur de sine și de ceea ce afirmă.

Cercetarea și învățămîntul sînt aproape inseparabile și suferă adeseori că nu sînt asociate. Cercetarea alimentează învățămîntul, iar învățămîntul, indispensabil pentru ca făclia științei să treacă de la o generație la cea următoare, fortifică cercetarea. Și totuși, din motivele pe care le-am analizat, există într-adevăr o anumită opoziție între aceste două maméle la care se hrănesc nivelurile ridicate ale cunoașterii. Învățămîntul, cel puțin la nivel superior, și munca de cercetare sînt ca doi frați dușmani uniți printr-o strînsă legătură de rudenie pe care n-o pot rupe niciodată și între care există cu toate acestea un fel de antagonism secret și permanent. Cercetarea comportă în mod necesar o neliniște perpetuă, învățămîntul tinde de la sine către o certitudine imperturbabilă, care este opusul neliniștii. Aceasta este într-adevăr ceea ce a exprimat cu multă finețe Charles Péguy în fraza care mi-a servit ca temă.

ÎN LEGĂTURĂ CU NOUL SISTEM DE UNITĂȚI[1]

Doamnelor, domnilor,

Un decret care va fi publicat destul de curînd va legaliza în Franța un nou sistem de unități de măsură. Abrogînd legea din 2 aprilie 1919, care adopta ca unitate de lungime metrul, ca unitate de masă tona și ca unitate de timp secunda, sistemul M.T.S., care în practică a fost destul de puțin utilizat, noul decret va adopta un sistem de tipul M.K.S., cu metrul ca unitate de lungime, kilogramul ca unitate de masă și secunda ca unitate de timp, unități cărora li se vor adăuga ca unități de intensitate de curent electric, de intensitate luminoasă și de temperatură, amperul, lumenul și gradul Kelvin. Va fi astfel stabilit un sistem de unități foarte coerente. Unul din marile avantaje ale noului sistem este că el conduce la exprimarea energiilor în jouli și a puterilor în wați, stabilind astfel o joncțiune perfectă între unitățile mecanice întrebuințate și unitățile electrice ale sistemului zis „practic" pe care le introduce definiția amperului. Sistemul c.g.s., pe care fizicienii îl agreează, va rămîne fără îndoială utilizat în practică, dar unele unități vechi, a căror definiție este defectuoasă, cum ar fi kilogramul-forță și calul-putere, vor trebui să dispară.

---

[1] Discurs pronunțat la Adunarea generală anuală din 15 iunie 1960 a Societății de sprijinire a prietenilor științei.

Reforma astfel realizată este conformă dorințelor formulate cu cîțiva ani în urmă de către Conferința internațională de Greutăți și Măsuri și rămîne în cadrul general al sistemului metric introdus în Franța în timpul revoluției, prin legile din 1 august 1793 și din 18 germinal al anului III. Principalul avantaj al sistemului metric este că utilizează o scară în întregime zecimală care se acordă cu caracterul zecimal al sistemului de numărare folosit la ora actuală în toate țările civilizate. Nu așa stau lucrurile cu unitățile adoptate în țările anglo-saxone, care n-au caracter zecimal și care se pretează foarte greu la calculul din sistemul de numărare pe baza zece. Așa încît trebuie să se reziste energic la infiltrarea în Franța a unităților anglo-saxone și să se dorească, dimpotrivă, ca sistemul metric pe bază zecimală să sfîrșească prin a fi adoptat de toate țările lumii.

Cu ocazia micului eveniment științific pe care îl va constitui noul decret privitor la unitățile de măsură, ar putea fi interesant să facem în legătură cu aceasta două observații care au o anumită importanță din punct de vedere psihologic.

În primul rînd, se poate remarca cît de dificil este de a obține adoptarea de către marele public a unor noi unități de măsură. Contrar multor altor chestiuni științifice, aceea a unităților de măsură atinge foarte direct marele public: aceste unități intervin, într-adevăr, în viața de toate zilele, în special în toate tranzacțiile comerciale, mici sau mari. Obișnuiți din copilărie să întrebuințeze anumite unități, majoritatea oamenilor abandonează cu greu folosirea lor pentru a adopta unități noi. În vechea Franță dinainte de revoluție, unitățile utilizate erau foarte complicate, adeseori nu aveau nici un caracter zecimal și variau chiar, păstrînd același nume, de la o provincie la alta. Infinit mai precise și mai ușor de mînuit au fost unitățile, devenite legale din 1795, ale noului sistem metric. Cu toate acestea, repulsia populației de a utiliza unități noi, al căror nume îi era pînă atunci necunoscut, a fost atît de mare, încît autoritățile n-au

îndrăznit să declare obligativitatea întrebuințării unităților metrice, așa încît vechile unități, cu toate inconvenientele lor, au continuat să fie folosite în mod curent, în special la țară. A trebuit să se aștepte o jumătate de secol pentru ca o lege decretată sub domnia lui Ludovic - Filip să facă obligatorie întrebuințarea sistemului metric. Iar aplicarea acestei legi a stîrnit agitație și chiar a dat loc la rebeliuni pe unele piețe din provincie atunci cînd comercianții au fost constrînși să i se supună. Mai trebuie să menționăm că folosirea vechilor unități a dăinuit multă vreme în diverse regiuni rurale și fără îndoială că sporadic mai dăinuie pe alocuri. Încetineala cu care publicul se adaptează la noua unitate monetară, francul nou, devenită legală de la începutul acestui an, arată cît de dificil este — chiar atunci cînd trecerea de la vechea la noua unitate este foarte lesnicioasă — de a rupe în această privință cu obișnuințe înveterate. Cu toate prescripțiile noului decret, trebuie să ne așteptăm ca părăsirea de către mecanicieni a kilogramului-forță și de către industria automobilului a calului-putere să nu aibă loc fără unele dificultăți.

O altă observație ce se poate face în legătură cu unitățile este următoarea: cu toate că problemele care se pun în legătură cu ele ar putea să pară destul de aride și austere, discuțiile care se ridică în privința lor între specialiști capătă adeseori un caracter foarte aprins. Acest lucru ar putea să ne mire, căci în fond orice sistem de unități bine definit și coerent este acceptabil și a alege între aceste sisteme este mai curînd o chestiune de tendințe personale și de obișnuințe dobîndite. Dar tocmai fiindcă intervin tendințele și obișnuințele, punerea de acord e dificilă. Obișnuiți din tinerețe să se servească de anumite unități sau să execute anumite schimbări de unități, celor care se servesc de ele le repugnă să se familiarizeze cu alte sisteme noi: valorile anumitor constante fundamentale s-au imprimat în memoria lor sub forma anumitor numere care le sînt familiare, le vine greu să ia în considerare înlocuirea unor numere prin altele și se

tem de confuziile care ar putea să rezulte de aici. Mecanicienii obișnuiți să ia în considerare corpuri cu masă mare ar prefera să păstreze ca unitate de masă tona, așa cum a fost ea definită prin legea din 1919, decît să revină la kilogram, așa cum li se va cere să facă. Mulți fizicieni sînt atașați de sistemul c.g.s. și le place să jongleze cu unitățile electrostatice și electromagnetice c.g.s., unora le place chiar să întrebuințeze sistemul de unități mixte al lui Gauss-Lorentz care combină utilizarea unităților electrostatice și a unităților electromagnetice c.g.s. și permite astfel să se dea celebrelor ecuații ale lui Maxwell o formă simplă și simetrică deosebit de sugestivă; dimpotrivă, electricienii și radioelectricienii, obișnuiți să se servească de unități zise practice, preferă sistemul Giorgi sau M.K.S.A., care permite realizarea joncțiunii între unitățile mecanice și unitățile electrice și care servește drept bază reformei a cărei realizare este iminentă.

Un vechi proverb spune: „Despre gusturi și culori nu trebuie să se discute", ceea ce înseamnă că de fiecare dată cînd intervin sentimentele și înclinațiile individuale, e foarte greu să se evite discuții aprige și să se ajungă la o punere de acord. S-ar putea crede că pentru probleme atît de strict științifice cum este alegerea unităților de măsură, proverbul, adaptat la contingențele vieții de toate zilele, nu-și poate găsi aplicare. Dar aceasta ar însemna să uităm că, dacă știința este în principiu independentă de părerile preconcepute și de slăbiciunile omenești, savanții le sînt supuși, căci sînt oameni ca și ceilalți. Iată de ce austerele discuții asupra unităților de măsură sînt uneori foarte aprinse. Să conchidem deci, cu puțină ironie, parafrazînd proverbul clasic și zicînd: „Despre gusturi și unități poate să se discute întotdeauna".

CU PRIVIRE LA EVOLUȚIA ÎNVĂȚĂMÎNTULUI[1]

Doamnelor, domnilor,

Științele și aplicațiile lor au căpătat de cîțiva ani un rol din ce în ce mai important în evoluția civilizațiilor umane. Această afirmație este de un adevăr atît de evident, încît este inutil să i se aducă probe amănunțite. Dealtfel, această intervenție din ce în ce mai largă a științelor și a tehnicilor în toate aspectele vieții oamenilor de astăzi merge accelerîndu-se din an în an și nimic nu lasă să se prevadă că această mișcare s-ar putea încetini într-un viitor apropiat.

Deoarece instrucțiunea are ca scop esențial de a-i pregăti pe tineri pentru sarcinile pe care le vor avea de îndeplinit mai tîrziu în cursul existenței lor, este evident că cunoștințele științifice și tehnice trebuie să ocupe un loc din ce în ce mai important în programele de învățămînt. Și cum numărul orelor de curs sau de exerciții practice, precum și capacitățile de atenție și de asimilare ale tinerelor inteligențe rămîn în mod necesar limitate, rezultă ineluctabil o reducere progresivă a timpului consacrat în învățămînt altor aspecte ale formării intelectuale și morale a elevilor. De aici decurge o schimbare profundă în orientarea formării tinerelor spirite și această schimbare, efectuată în

[1] Discurs pronunțat la Adunarea generală anuală din 7 iunie 1961 a Societății de sprijinire a prietenilor științei.

parte la ora actuală, nu poate decît să se accentueze mereu sub presiunea prestigiului crescînd al științelor și a necesităților cotidiene de ordin tehnic și economic.

Reflectînd la această problemă, putem înțelege de îndată în ce mod a fost și va fi din ce în ce mai mult nevoit să se transforme învățămîntul la nivelurile medii și superioare. Pe de o parte, în loc de a se adresa unei elite restrînse, el trebuie să devină accesibil unui număr crescînd de tineri, de așa manieră încît să furnizeze cercetărilor științei pure și aplicațiilor tehnice cadrele tot mai numeroase de care acestea au nevoie. Pe de altă parte și corelativ, locul ocupat de studiul științelor și al tehnicilor în școli și în universități trebuie să devină din ce în ce mai larg, ceea ce nu se poate întîmpla, așa cum am spus, fără a micșora locul rezervat în ansamblul învățămîntului disciplinelor clasice.

Dacă aceasta este o consecință inevitabilă a cursului însuși al lucrurilor, ne putem întreba pe drept cuvînt dacă ea nu riscă să aibă urmări în anumite privințe regretabile asupra ansamblului calităților intelectuale și morale ale generațiilor care urmează și dacă există oarecare mijloace de a atenua aceste eventuale pericole. Pentru a studia această problemă este important, în primul rînd, să se precizeze bine care sînt eventualele pericole.

Studiul științelor și al aplicațiilor lor la toate nivelurile exersează evident spiritele să raționeze bine și să fie precise. El conduce la formarea obișnuințelor de muncă și a perseverenței, la dobîndirea calităților de onestitate și sinceritate intelectuală. Acest studiu asociază pe cel ce i se dedică unui mare efort colectiv de progres în domeniul ideilor și în cel al acțiunii. Învățămîntul științific este deci departe de a fi lipsit de valoare intelectuală și morală. Există însă o umbră în acest tablou. Științele și tehnicile, atunci cînd rămîn riguros pe terenul care le este propriu, rămîn în esență îndreptate spre studiul lumii materiale și al realităților concrete: din acest motiv, ele au tendința

să facă abstracţie de om şi de tot ce constituie bogăţia vieţii sale interioare, intelectuale, morale sau sentimentale. Desigur, omul de ştiinţă sau tehnicianul se preocupă, din fericire, adesori de fiinţa umană, de nevoile sale, de plăcerile sau de suferinţele sale, dar, atunci cînd o face, el introduce în gîndirea sa consideraţii care nu sînt strict ştiinţifice şi tehnice. Substituind un învăţămînt prea pur ştiinţific învăţămîntului clasic de tendinţă umanistă, nu vom provoca oare în rîndul generaţiilor viitoare o slăbire simţitoare a sensului a ceea ce este uman, o periculoasă restrîngere a tuturor orizonturilor în domeniile morale, sentimentale şi chiar intelectuale?

Iată şi un alt pericol. Învăţămîntul clasic, centrat în esenţă pe studiul omului şi al vieţii sale interioare şi exterioare, acordă un loc de frunte artei de a-ţi exprima gîndirea cu eleganţă şi precizie. Or, acest lucru este foarte important pentru literatură, elocinţă, administraţie sau afaceri, dar şi pentru ştiinţa şi tehnica înseşi. În timpurile cînd în ştiinţă şi în tehnică concepţiile şi procedeele de realizare devin cu fiecare zi mai subtile şi mai complexe, nu este oare deosebit de necesar să ştim să le expunem cu claritate şi fără ambiguitate? Dar cum să facem aceasta dacă nu stăpînim pe deplin limba în care le exprimăm? Această stăpînire desăvîrşită, va şti oare noul învăţămînt s-o transmită?

Acestea sînt pericolele ce pot fi sesizate în evoluţia actuală şi ireversibilă a învăţămîntului. Aici nu putem decît să arătăm în cîteva cuvinte cum ar putea fi evitate. În primul rînd, va fi necesar să se păstreze, cel puţin în învăţămîntul elementar şi mediu ce se capătă înainte de vîrsta specializărilor, un loc important anumitor discipline care caracterizau studiile clasice de altădată. Dacă menţinerea studiului limbilor şi al operelor literare ale antichităţii pe locul pe care îl deţineau altădată în studiile de gradul doi pare imposibilă, în schimb pare foarte de dorit ca o parte însemnată a programelor să rămînă rezervată însuşirii cunoştinţelor

literare, psihologice și morale; astfel s-ar putea continua să se transmită adolescenților acea cunoaștere a valorilor umane care avea ca scop să le pună la îndemînă metodele, ce nu pot fi menținute în întregime, ale umanismului clasic. Va trebui, de asemenea, să se păstreze un loc important istoriei și geografiei, a căror cunoaștere este atît de instructivă, singurele dealtfel care ne permit să înțelegem cum descind oamenii de azi din oamenii de ieri și din mediul ce-i înconjură.

Deoarece disciplinele științifice sînt, desigur, chemate să țină de acum înainte un loc considerabil în formarea tinerilor, ar putea fi util să se introducă chiar și în aceste cursuri unele elemente susceptibile de a „umaniza" acel element impersonal pe care cunoștințele pur raționale sau utilitare le pot avea în exces. O modalitate de a ajunge la aceasta ar fi de a rezerva în aceste cursuri un locșor istoriei științelor și unor sinteze asupra mersului gîndirii științifice, sinteze cărora li se dă adeseori denumirea cam inexactă de „filozofia științelor".

Să încercăm acum să rezumăm în cîteva cuvinte problema pe care am examinat-o mai sus sub unele aspecte. Complexitatea crescîndă a civilizațiilor contemporane și a tuturor activităților care sînt necesare funcționării lor cere ca instrucțiunea să fie mult mai larg răspîndită decît altădată. În plus, locul deținut în viața omenirii de către știință și tehnică devenind pe zi ce trece tot mai mare, este indispensabil ca știința și tehnica să ocupe de acum înainte un loc foarte mare în învățămînt. O reformă profundă a cadrelor și a programelor de studii a și rezultat de aici și va continua. Ne-am putea teme, pe drept cuvînt, ca, sub influența specializării și a caracterului impersonal al cunoștințelor pur științifice și tehnice, anumite valori, care ar fi important să fie păstrate, să nu cumva să se piardă și ca, în domeniul culturii, o extindere a bazei să nu antreneze o nivelare a vîrfurilor. Nu trebuie totuși uitat că în multe cazuri se operează

restabiliri de echilibru și că facultatea de a se adapta la circumstanțe noi este una din principalele caracteristici ale ființelor vii. Putem deci, trebuie chiar, să sperăm că omenirea civilizată va ști în viitor să se adapteze unor condiții intelectuale și materiale foarte diferite de acelea care au existat în trecut fără ca, din această cauză, să piardă în domeniul gîndirii și al acțiunii gustul pentru orizonturi largi și aspirații înalte.

NECESITATEA LIBERTĂȚII ÎN CERCETAREA ȘTIINȚIFICĂ[1]

Doamnelor, domnilor,

Cercetarea științifică, sub o formă simplă și primitivă, a existat încă de la începuturile omenirii. Înconjurați de o natură de la care trebuiau să utilizeze resursele, să-i evite pericolele și să-și obțină mijloacele de existență, oamenii au fost constrînși să o observe, să caute s-o înțeleagă, să desprindă din fluxul necontenit al fenomenelor naturale acele regularități pe care le numim legi. Au trebuit însă să treacă multe secole pentru ca cunoștințele dobîndite să înceapă să se consolideze, pentru ca diferitele ramuri ale științei să se separe și să se organizeze, pentru ca învățămîntul oral și scris să permită transmiterea progreselor realizate generațiilor succesive.

Abia la începutul epocii moderne, în secolele al XVI-lea și al XVII-lea, vedem creîndu-se importante centre de cercetare și de învățămînt, iar oamenii de știință se hotărăsc să se grupeze în Academii sau Societăți științifice pentru a-și comunica descoperirile și a le discuta între ei. Dar pînă în cursul secolului al XIX-lea organizarea cercetărilor și a învățămîntului rămîne încă destul de slabă și destul de embrionară. Oamenii de știință mai lucrează încă dispersați, urmărindu-și fiecare

[1] Discurs pronunțat la Adunarea generală anuală din 6 iunie 1962 a Societății de sprijinire a prietenilor științei.

ideile sau experiențele proprii, fără mari mijloace materiale la dispoziție și, cel mai adeseori, fără multă legătură cu ceilalți cercetători. Situație oarecum anarhică fără îndoială, care nu era deloc favorabilă eforturilor coordonate și progreselor rapide, dar care lăsa cîmp liber tuturor inițiativelor individuale, tuturor tentativelor îndrăznețe ale spiritelor viguroase.

De la începutul secolului nostru, și în special în ultimii douăzeci sau treizeci de ani, această situație s-a modificat profund ca urmare a complicării mereu crescînde a noilor nevoi tot mai mari ale civilizației industriale și tehnice în care trăim. A fost necesar să se organizeze un număr sporit de laboratoare a căror dotare foarte complexă cere credite tot mai considerabile, a trebuit să se stabilească contacte multiple între cercetătorii din ce în ce mai specializați, să se creeze centre de învățămînt din ce în ce mai tentaculare, care parvin cu greu să răspundă nevoilor unui număr crescînd de studenți.

De aici a rezultat o rapidă evoluție a întregii organizări a cercetării și a învățămîntului. Evoluție utilă, desigur, și chiar necesară, căci numai ea poate permite să se facă față nevoilor actuale ale științelor și ale tehnicii, poate să le furnizeze organismele și mijloacele materiale de care au nevoie, să asigure posibilitatea unor noi cercetări în domeniile în care ele sînt necesare. În schimb, această evoluție prezintă și multe inconveniente. Înmulțirea organismelor administrative, intervenția permanentă a birourilor, adeseori atinse de deformare profesională, permanente preocupări financiare, tendințe spre organizări mai mult sau mai puțin rigide, spre „planificări" imperative, care riscă să închidă activitatea cercetătorilor și a profesorilor într-un corset rigid, iată cîteva din inconvenientele pe care noua orientare pare a le prezenta. De acum înainte nu numai cariera cercetătorilor și a profesorilor, dar — ceea ce este mult mai grav — orientarea însăși a activității lor riscă să fie din ce în ce mai mult supuse deciziilor administratorilor și comisiilor

de specialiști. Fără îndoială, acești administratori sau membrii acestor comisii vor fi în general conștiincioși și competenți, dar vor ști ei oare întotdeauna să scape de influența ideilor preconcepute sau a tendințelor personale? Istoria științelor arată că cele mai mari progrese au fost efectuate de gînditori îndrăzneți, care au sesizat căi noi și fecunde pe care alții nu le observaseră. Dacă ideile savanților de geniu, care au fost promotorii științei moderne, ar fi fost supuse unor comisii de specialiști, ele le-ar fi părut acestora extravagante și ar fi fost înlăturate tocmai din cauza originalității și profunzimii lor. De fapt, unii dintre acești promotori — luptele susținute altădată de Fresnel și de Pasteur ar fi suficiente pentru a o dovedi — s-au izbit de ostilitatea și de incomprehensiunea unor savanți eminenți; ei au triumfat asupra acestora, dar, pe măsură ce organizarea cercetării devine mai rigidă, crește pericolul ca ideile noi și fecunde să nu se poată dezvolta liber.

Să tragem în cîteva cuvinte concluzia la cele precedente. În timp ce, prin forța însăși a lucrurilor, asupra cercetării și învățămîntului științific crește apăsarea structurilor administrative, a preocupărilor financiare și armătura greoaie a reglementărilor și a planificărilor, este mai indispensabil decît oricînd să prezervăm libertatea spiritului științific, libera inițiativă a cercetătorilor originali, pentru că ele au fost întotdeauna și vor fi, fără îndoială, întotdeauna izvoarele cele mai fecunde ale marilor progrese ale științei.

CU PRIVIRE LA CONSECINȚELE PROGRESULUI ȘTIINȚEI[1]

Doamnelor, domnilor,

Intrăm într-o perioadă în care totul pare să arate că aplicațiile științelor vor juca în viața societăților omenești un rol din ce în ce mai important. Profitînd de descoperirile care, de două secole încoace, s-au acumulat într-un ritm tot mai accelerat, tehnica și-a înmulțit invențiile din ce în ce mai rafinate. Ea a invadat viața noastră cotidiană și a ameliorat-o considerabil în multe privințe, a suprimat aproape distanțele pe suprafața pămîntului, a permis omului să audă și să vadă de la distanță. Ea începe să facă posibilă explorarea spațiului care înconjură planeta noastră, deschizînd astfel oamenilor de mîine perspective de a putea reînnoi, la o scară mult mai mare, cutezătoarele fapte de eroism ale conchistadorilor Renașterii care, cu o îndrăzneală de necrezut, se avîntaseră în regiuni necunoscute. Medicina, chirurgia, farmacia au contribuit la prelungirea vieții omului și la alinarea suferințelor sale, în timp ce progresele biologiei, permițînd acțiunea directă a omului asupra organismelor vii, deschid deja perspective imense și uneori tulburătoare.

Este deci indispensabil de a forma în rîndul tinerelor generații un număr considerabil și mereu

[1] Discurs pronunțat în ședința publică anuală din 5 iunie 1963 a Societății de sprijinire a prietenilor științei.

în creștere de tineri savanți, medici, ingineri și tehnicieni care în lumea de mîine, dominată de știință și de tehnică, vor furniza cadrele necesare vieții cotidiene și rapidei sale evoluții. Astfel, celor care au sarcina organizării și dirijării învățămîntului li se pun grele probleme materiale, intelectuale și chiar morale, a căror soluționare rapidă este necesară și totodată presărată de dificultăți. De aici va rezulta, pentru un sector foarte larg al învățămîntului, o profundă schimbare în ce privește formarea tinerelor spirite. În mod logic această formare trebuie să reușească să furnizeze științei și tehnicii efectivele care le sînt necesare, însă cu prețul unei scăderi aproape sigure a culturii generale, cu prețul unei specializări aproape inevitabile. Acest lucru nu se va produce fără unele inconveniente, deoarece cultura generală, arta de a exprima bine gîndirea, vastitatea cunoștințelor, care permite descoperirea analogiilor ascunse și realizarea sintezelor fecunde, au jucat întotdeauna un mare rol în marile descoperiri ale științei și sînt neîndoielnic necesare progresului ei. De aceea este de dorit ca în sînul noilor elite de oameni de știință și de tehnicieni orientați spre perfecționări de amănunt, spre aplicații și spre calcule, să se mențină un fel de elită a elitei care, păstrînd gustul pentru idei generale și viziuni de ansamblu, să știe să realizeze marile descoperiri și progresele decisive care n-au fost niciodată opera unor specialiști prea înguști. Nu trebuie dealtfel să ne închipuim că mărirea numărului de cercetători va avea în mod necesar ca efect creșterea considerabilă a numărului acelora al căror nume va rămîne legat de noi capitole ale științei. Calitățile care le sînt necesare sînt daruri înnăscute pe care o cultură vastă le ajută să rodească, dar care nu ar putea fi create prin învățămînt, mai ales dacă acesta se îndreaptă prea exclusiv spre specializare și tehnică.

Așadar, este destul de greu de spus la ora actuală dacă progresele științei, în sensul ei cel mai general și mai elevat, vor fi sau nu accelerate prin dezvol-

tarea erei tehniciste ce pare a începe. Viitorul este în fața noastră, foarte promițător, desigur, dar și plin de teribile pericole, știm prea bine acest lucru. Nimic nu permite să ne sustragem inevitabilei lui veniri și nu putem decît să ne mărginim a spera. Astăzi mai mult ca oricînd, viitorul care ar putea fi atît de frumos sau atît de tragic este, pentru noi, acoperit de un văl des, iar ochii noștri nu sînt destul de pătrunzători spre a vedea dincolo de el care va fi destinul aventurii umane.

În pragul erei atomice, optimismul în ceea ce privește viitorul oamenilor rămîne un act de credință.

ŞTIINŢA ŞI APLICAŢIILE EI[1]

Acum o jumătate de secol, în introducerea la cartea sa *Ştiinţa modernă şi stadiul ei actual*, ilustrul matematician Émile Picard, căruia am avut onoarea de a-i urma ca preşedinte al societăţii dumneavoastră, constata cu oarecare îngrijorare că majoritatea oamenilor admiră în ştiinţă mai ales minunatul spectacol al aplicaţiilor ei, aplicaţii care au modificat atît de mult condiţiile de existenţă ale popoarelor civilizate. El exprima teama ca oamenii să nu-şi facă astfel decît o idee incompletă despre raporturile existente între progresele tehnicii şi ştiinţa teoretică şi dezinteresată, ale cărei descoperiri sînt adeseori izvorul celor mai neaşteptate aplicaţii. Or, spunea el, „acest izvor ar seca rapid dacă un spirit exclusiv utilitar ar ajunge să domine în societăţile noastre prea preocupate de satisfacţii imediate".

Din epoca în care Picard scria aceste rînduri, aplicaţiile ştiinţei şi performanţele tehnicii s-au dezvoltat într-un mod nemaiauzit, cu totul imposibil de prevăzut în primii ani ai secolului nostru. Şi cum această bruscă expansiune în domeniile cele mai diverse a răsturnat profund toate condiţiile

[1] Discurs pronunţat la Adunarea generală anuală din 2 iunie 1965 a Societăţii de sprijinire a prietenilor ştiinţei.

vieții omenești, opinia publică — deși dorind, bineînțeles, ca niciodată să nu se facă uz de groaznicele mijloace de distrugere de care dispunem astăzi — ar putea să ajungă cu ușurință să creadă că scopul principal și aproape exclusiv al științei este de a îmbunătăți condițiile existenței noastre și de a deschide noi domenii activităților noastre. Această manieră de a vedea este tocmai ceea ce altădată îl îngrijora pe Picard și pericolul pe care el îl semnala n-a încetat să existe.

Dacă vrem să luăm în considerare cu toată imparțialitatea această problemă, se cuvine ca mai întîi să aducem omagiu valorii nu numai practice, ci și intelectuale a ceea ce am numit mai sus aplicațiile științei și performanțele tehnicii. Cine a urmărit cît de puțin progresele nenumăratelor aspecte pe care le prezintă ele astăzi, nu poate să nu fie izbit de tot ceea ce reprezintă ca muncă, ingeniozitate și dificultăți învinse. Ar fi profund nedrept să nu aducem un omagiu la tot ceea ce comportă, ca eforturi și inteligență, opera săvîrșită de ingineri, de tehnicieni și de toți cei care se preocupă de aplicațiile științei.

Nu este însă mai puțin adevărat că rămîne ceva exact în temerile lui Émile Picard. Istoria științelor dovedește cu nenumărate exemple că marile aplicații au derivat aproape întotdeauna din marile descoperiri făcute de cercetători care nu se preocupau de aceste aplicații și care căutau, înainte de toate, să satisfacă acea dorință de înțelegere și de cunoaștere care este una dintre tendințele esențiale ale inteligenței umane. Pentru a nu da decît un exemplu care, ținînd de propriul meu domeniu de cercetări, are avantajul de a fi de absolută actualitate, voi cita celebra lucrare în care Albert Einstein, în 1917, a introdus noțiunile de emisii provocate și de emisii spontane de radiații. Urmărind exclusiv o satisfacție intelectuală, el

căutase atunci doar să pună în evidență o legătură ascunsă între legea radiației corpului negru a lui Planck și legea frecvențelor a lui Bohr. Or, în ultimii ani, această lucrare deja veche și cu aspect pur speculativ a călăuzit mereu în eforturile lor pe cei care au pus la punct acele admirabile aparate numite maseri și laseri.

Acest rol decisiv pe care îl joacă cercetările de știință pură și dezinteresată, de știință fundamentală cum se spune astăzi, în progresul aplicațiilor și al tehnicilor s-a menținut constant în cursul întregii istorii a științei și nu există nici un motiv să nu credem că el va rămîne esențial pentru progresele viitoare ale industriilor și ale tehnicilor. Cercetările științei fundamentale au fost și vor rămîne în mod cert izvorul fecund al tuturor aplicațiilor, iar Émile Picard avea, desigur, dreptate să spună că acest izvor ar seca în curînd dacă toți cercetătorii științifici n-ar mai avea în vedere decît scopuri utilitare.

Există deja un foarte serios motiv pentru a dori ca cercetarea științifică să nu se orienteze exclusiv către realizări practice: acest lucru pare de dorit în interesul însuși al progresului acestor realizări. Mai există însă și un alt motiv, de natură elevată, care conduce de asemenea la formularea acestei dorințe. Nesecata dorință de a cunoaște, bucuria supremă de a înțelege au făcut întotdeauna parte din marile forțe care orientează eforturile inteligenței omenești. Ele sînt onoarea speciei noastre, ele sînt acelea care au permis puțin cîte puțin omului cavernelor să devină omul secolului al XX-lea. Această dorință de a înțelege, această dragoste de a cunoaște sînt caracteristici esențiale ale spiritului uman; ele îi conferă pe suprafața planetei noastre o superioritate pe care calculatoarele electronice, cu toată precizia și rapiditatea uimitoare cu care știu să efectueze calculele ce li se

cer, nu sînt în stare să i-o răpească. Ar fi o groaznică decădere pentru specia umană de a nu mai păstra aceste tendințe înnăscute care au stat la originea tuturor progreselor sale. Inspirîndu-ne dintr-o bine cunoscută frază a lui Montaigne, vom încheia spunînd: dacă știința trebuie să fie întotdeauna și din ce în ce mai mult o unealtă de minunată folosință, ea trebuie de asemenea să rămînă în esență una din marile podoabe ale spiritului nostru.

Sumar

Cuvînt înainte: *Edmond Nicolau* 5

Prefaţă: *Louis de Broglie* 17

ARTICOLE CU CARACTER GENERAL

Anxietatea mea în faţa problemei cuantelor 23

Reprezentările concrete în microfizică 32

Ideile care mă călăuzesc în cercetările mele 52

EXPUNERI ŞTIINŢIFICE RECENTE
(1961—1965)

Fenomenele fotoelectrice 75

Dispozitive cu semiconductori 81

Mecanica ondulatorie şi microscopia electronică 91

Laserii şi importanţa lor teoretică 96

Coexistenţa fotonilor şi undelor în radiaţiile electromagnetice şi teoria dublei soluţii 108

Fizica teoretică. Despre relaţia de incertitudine $\delta n \cdot \delta \varphi \geqslant 2\pi$ 124

Termodinamica „ascunsă" a particulelor 129

Mecanica ondulatorie. Despre teoria focarelor cinetice în termodinamica particulei izolate 153

NOTE ŞI DISCURSURI

Notă despre viaţa şi opera lui Georges Darmois .. 159
Notă despre viaţa şi opera lui Jean Becquerel 182
Notă despre viaţa şi opera lui Camille Gutton .. 202
Omagiu naţional lui Jean Perrin 222
Viaţa şi opera lui Niels Bohr 227
Omagiu memoriei lui Émile Meyerson 235
Pascal — om de ştiinţă 243
Galilei şi zorile ştiinţei moderne 255
Cercetarea şi învăţămîntul 273
În legătură cu noul sistem de unităţi 277
Cu privire la evoluţia învăţămîntului 281
Necesitatea libertăţii în cercetarea ştiinţifică 286
Cu privire la consecinţele progresului ştiinţei 289
Ştiinţa şi aplicaţiile ei 292

COLECȚIA

IDEI CONTEMPORANE

În pregătire:

★ ★ ★ **Procese revoluționare în știință și tehnică și dezvoltarea societății**

★ ★ ★ **Știința și contemporaneitatea**

★ ★ ★ **Catastrofă sau o nouă societate ?** (Un model latino-american al lumii) **Modelul Bariloche**

J. W. BOTKIN, M. ELMANDJRA, M. MALIȚA — **Orizontul fără limite al învățării** (Raport către Clubul de la Roma)

COLECTIV SUB EGIDA UNESCO — **Rasismul în fața științei**

SHINGO SHIBATA — **Filozofia marxistă și revoluția științifică-tehnică**

K. GALBRAITH — **Știința economică și interesul public**

BERTRAND DE JOUVENEL — **Progresul în om** (Contribuții la o critică a civilizației puterii)

D. GABOR și U. COLOMBO — **Să ieșim din epoca risipei** (Raport către Clubul de la Roma)

ALBERT SZENT-GYÖRGYI — **Pledoarie pentru viață** (texte)

ALBERT EINSTEIN — **Fizica și realitatea** (texte)

P. L. KAPIȚA — **Experiment, teorie, practică**

ALFRED KASTLER — **Această stranie materie**

★ ★ ★ **Direcții și tendințe contemporane în studierea fenomenului religios** (texte)

JÜRGEN HABERMAS — **Texte social-filozofice**

P.-H. CHOMBART DE LAUWE — **Cultura și puterea**

M. E. OMELIANOVSKI — **Dialectica în fizica contemporană**

ADAM SCHAFF — **Istorie și adevăr**

ERICH FROMM — **Scrieri filozofice**

MARIO BUNGE — **Filozofia ştiinţei** (texte)

LUDWIG VON BERTALANFFY — **Teoria generală a sistemelor**

J. GALTUNG — **Metodologie şi ideologie**

HANS SELYE — **Mesajul omului de ştiinţă** (texte)

STÉPHANE LUPASCO — **Logica dinamică a contradictoriului** (texte)

JEAN-PAUL SARTRE — **Critica raţiunii dialectice**

ERNST BLOCH — **Principiul speranţei**

KARL JASPERS — **Scrieri filozofice**

MARTIN HEIDEGGER — **Staţiuni ale drumului**

EDMUND HUSSERL — **Scrieri filozofice alese**

Redactor : SANDA MIHĂESCU-BOROIANU
Tehnoredactor : FLORIAN SĂPUNĂRESCU

Format 24/60×90. Coli editură 13,64. Coli tipar 12,50.
Bun de tipar 27 februarie 1980.
Apărut — septembrie 1980.

Comanda nr. 8961/90 152
Combinatul poligrafic „Casa Scînteii",
Piaţa Scînteii nr. 1, Bucureşti,
Republica Socialistă România

ÎN COLECȚIA «IDEI CONTEMPORANE»
AU APĂRUT:

* * * Știință și sinteză — Colocviu UNESCO
R. Garaudy: Marxismul secolului XX
G.N. Volkov: Sociologia științei
L. Althusser: Citindu-l pe Marx
V. Roman: Revoluția științifică și tehnică. Eseuri
R. Richta și colectiv: Civilizația la răscruce
M. Dufrenne: Pentru om
L. Goldmann: Sociologia literaturii
P.V. Kopnin: Bazele logice ale științei
I. Nikolov: Cibernetica și economia
N. Wiener: Sînt matematician
N.N. Constantinescu: Problema contradicției în economia socialistă
I. Hermann: Kitsch-ul, fenomen al pseudoartei
A. Pelletier, J.J. Goblot: Materialismul istoric și istoria civilizațiilor
A. Toffler: Șocul viitorului
R. Florian: Reflecții asupra filozofiei marxiste
* * * Mutații contemporane în știință și tehnică și implicațiile lor
* * * Știință, filozofie, ideologie
M. Drăgănescu: Muncă și economie
* * * Revoluția științifică-tehnică și progresul
L. Sève: Marxismul și teoria personalității
G. Lukács: Ontologia existenței sociale
* * * Revoluția socialistă și revoluția științifică-tehnică
M. McLuhan: Galaxia Gutenberg
M. Mesarović, E. Pestel: Omenirea la răspîntie
C. Wright Mills: Imaginația sociologică
T. Kotarbinski: Tratat despre lucrul bine făcut
* * * Revoluția științifică-tehnică și modernizarea forțelor de producție
M. Drăgănescu: Sistem și civilizație
E. Bonnefous: Omul sau natura?
C.I. Gulian: Marxism și structuralism
N.N. Constantinescu: Economia protecției mediului natural
I.T. Frolov: Progresul științei și viitorul omului
H. Marcuse: Scrieri filozofice
N.P. Dubinin: Mișcarea eternă
* * * Problemele păcii și ale războiului în condițiile revoluției științifice și tehnice. Necesitatea istorică a dezarmării
W. Heisenberg: Pași peste granițe
Coordonator **Jan Tinbergen:** Restructurarea ordinii internaționale
C. Lévi-Strauss: Antropologia structurală
* * * Corelația dintre infrastructura, structura și suprastructura societății socialiste din România în condițiile revoluției științifice și tehnice
N. Georgescu-Roegen: Legea entropiei și procesul economic
A. Toynbee: Orașele în mișcare
B.G. Kuznețov: Rațiune și ființare
E. Schrödinger: Ce este viața? ● Spirit și materie
Bary Commoner: Cercul care se închide (Natura, Omul și Tehnica)
G. Prestipino: Natura și societatea

Lei 12

EDITURA POLITICĂ